

# **Efeitos do Vento Sobre Painéis Fotovoltaicos Aplicados em Coberturas de Edifícios - Martifer Solar**

*Rúben Augusto Gomes da Cunha Barbosa*

## **Relatório de Dissertação de Mestrado**

Orientador na FEUP: Prof. Eng. José Manuel Laginha Mestre da Palma

Orientador na Martifer Solar: Eng. José Carlos Amador



**FEUP**

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**  
**Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

2013-01-31

*À minha família*



## Resumo

A análise do escoamento atmosférico sobre edifícios assume particular importância aquando da caracterização das instalações fotovoltaicas em coberturas.

As técnicas de cálculo utilizadas neste trabalho resultaram da apreciação do Eurocódigo 1 - Ações em Estruturas, mais concretamente as constantes na secção 1-4: Ações do Vento. No entanto, em casos específicos, e dado o carácter generalista desta norma, a mesma pode revelar-se insuficiente, tornando-se indispensável o recurso a métodos auxiliares como aqueles que se baseiam na análise computacional. Desta forma, usou-se a aplicação *Ansys Fluent* na formulação *Reynolds averaged Navier-Stokes* (RaNS), com o modelo de turbulência *k-ε padrão*.

Numa fase inicial realizou-se uma primeira abordagem aos programas *Ansys Fluent* e *Icem CFD* estudando-se o caso de um edifício com cobertura plana sem a presença do painel fotovoltaico. Neste passo, verificou-se a influência da dimensão do volume de controlo bem como do refinamento geral e local da malha nos resultados obtidos.

A fase seguinte consistiu em simulações para diferentes direções e intensidades do escoamento sobre a cobertura do edifício e sobre o painel fotovoltaico com diversas inclinações. Sendo assim, foi obtida a força resultante na cobertura e no painel, analisando-se o ponto de aplicação da mesma.

Quando os painéis fotovoltaicos foram submetidos a ventos de uma zona posterior do edifício para uma zona anterior do mesmo (180°), estes apresentaram resultados instáveis devido à interseção com o escoamento incidente. Este caso ocorreu para inclinações do painel a 20° e 30°.

Os resultados numéricos obtidos para a pressão do vento exercida sobre a zona final da cobertura, designada zona *I*, revelaram valores superiores, em média 334%, quando em comparação com o Eurocódigo EC1-4[15].



## Wind Effects on Photovoltaic Panels applied on Flat Rooftops - Martifer Solar

### Abstract

The analysis of the atmospheric flow over buildings is particularly important when characterising photovoltaic systems on roofs.

The calculation techniques used in this study resulted from the assessment of Eurocode 1 - Actions on Structures specifically those contained in the section 1-4: Wind Actions. However, in specific cases, and given the generalist character of this code, it may reveal itself as insufficient and therefore becomes necessary to use methods like those based on the computational analysis. Thus this work resorted to the use of the application *Ansys Fluent* in its *Reynolds averaged Navier Stokes* (RaNS) formulation, with the *k-ε Standard* Turbulence Model.

Initially this paper made a first approach to *Ansys Fluent* and *Icem CFD* analyzing the case of a building with flat roof without the presence of photovoltaic panels. This step made possible the verification of the influence of the size of the volume control and of the refinement of local and general mesh in the results obtained.

The next step consisted in simulations with different directions and intensities of the flow on the roof of a building and on the photovoltaic panel being the latter subjected to various inclinations. Therefore the resultant force on the roof and panel was obtained and analysis was made to its point of application.

When subjected to winds coming from the back of the building to its front (180°) the photovoltaic panels presented unstable results due to the intersection with the incident flow. This event occurred when the panels had angles of 20° and 30°.

The numeric results obtained for wind pressure at the end of the roof, the *I* zone, revealed to be superior, 334% in average, when compared with Eurocode EC1-4[15].

## **Agradecimentos**

Quero agradecer ao professor Eng. José Manuel Laginha Mestre da Palma pela orientação e transmissão de conhecimentos que me proporcionou. Ao Eng. José Carlos Amador pela oportunidade concedida de realizar este projeto na Martifer Solar bem como todos os conselhos e apoio que me foi dando durante este período.

À minha família, principalmente aos meus pais, irmã e Diana pela força transmitida na conclusão de mais uma fase na minha vida.

A todos que partilharam comigo o gabinete de I&D+I na Martifer Solar, em especial ao Eng. Rui Garcia e ao meu companheiro de trabalho e amigo Leandro.

## Índice de Conteúdos

1	Introdução .....	2
1.1	Apresentação da Martifer Solar.....	3
1.2	Objetivos .....	3
1.3	Organização do relatório .....	3
2	Equações fundamentais – Modelo computacional .....	4
2.1	Introdução .....	4
2.2	Equações governativas.....	5
2.2.1	Conservação da Massa – Equação da continuidade .....	5
2.2.2	Equação de quantidade de movimento .....	5
2.3	Modelo de turbulência.....	6
2.3.1	Modelo k- $\epsilon$ padrão .....	6
3	Abordagem ao Eurocódigo .....	7
3.1	Introdução .....	7
3.2	Definição de velocidades .....	8
3.3	Turbulência do vento.....	9
3.4	Pressão dinâmica de pico .....	9
3.5	Coeficientes de pressão em terraços.....	9
4	Modelo Calibração .....	10
4.1	Introdução .....	10
4.2	Pré-processamento.....	11
4.2.1	Sentido e intensidade do vento.....	11
4.2.2	Volume de controlo e condições de fronteira.....	11
4.2.3	Tipo de malha e critério de convergência .....	13
4.2.4	Distância adimensional wall $y^+$ .....	13
4.2.5	Intensidade da turbulência.....	14
4.2.6	Rácio de viscosidade turbulenta .....	14
4.3	Pós-processamento .....	14
4.3.1	Análise de malha .....	14
4.3.2	Análise de $y^+$ .....	15
4.3.3	Campos de velocidade e pressão.....	15
4.4	Síntese .....	17
5	Modelação Final .....	18
5.1	Introdução .....	18
5.2	Pré-processamento.....	19
5.2.1	Descrição do problema .....	19
5.2.2	Definição do volume de controlo.....	19
5.2.3	Definição de malha e critério de convergência .....	19
5.2.4	Definição das condições de fronteira.....	19
5.2.5	Localização do painel fotovoltaico na cobertura .....	20
5.2.6	Definição da força resultante e respectivo ponto de aplicação.....	20
5.2.7	Perfil de velocidades.....	20
5.3	Pós-processamento .....	21
5.3.1	Análise do volume de controlo.....	21

5.3.2	Verificação de $y^+$ e critério de convergência .....	21
5.3.3	Fenómenos na cobertura plana .....	22
5.3.4	Fenómenos no painel fotovoltaico .....	26
5.3.5	Inserção de platibanda.....	30
5.3.6	Ansys Fluent Vs. EC1-4.....	32
6	Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	34
6.1	Conclusões .....	34
6.2	Desenvolvimentos futuros .....	35
7	Referências e Bibliografia .....	37
8	ANEXOS .....	40
ANEXO A:	Soluções Martifer Solar .....	41
ANEXO B:	Orientação de eixos e modelos de apoio .....	42
ANEXO C:	Tipo de malha .....	43
ANEXO D:	Eurocódigo EC1-4 .....	44
ANEXO E:	Campos de velocidade e pressão .....	46

## Nomenclatura

$T$	Altura de volume de controlo	m
$h$	Altura do edifício	m
$z_{max}$	Altura máxima segundo EC1	m
$z_{min}$	Altura mínima segundo EC1	m
$\beta$	Ângulo de sombreamento	°
$A$	Área do painel fotovoltaico para escoamento bidimensional	m <sup>2</sup>
$C_e(z)$	Coeficiente de exposição	
$c_p$	Coeficiente de pressão	
$k_r$	Coeficiente do terreno	
$z_0$	Comprimento de rugosidade	m
$L$	Dimensão a jusante do edifício	m
$S$	Dimensão a montante do edifício	m
$R$	Dimensão do telhado	m
$d$	Distância de sombreamento	m
$y^+$	Distância normal em coordenadas de parede	
$k$	Energia cinética turbulenta	J/Kg
EC1	Eurocódigo 1 – Ações em estruturas; Parte 1-4 Ações gerais do vento	
$C_{dir}$	Fator de direção	
$C_{season}$	Fator de época	
$C_0(z)$	Fator de orografia	
$C_r(z)$	Fator de rugosidade	
$F_{res}$	Força resultante	N
FV	Fotovoltaico	
$\lambda$	Inclinação do painel fotovoltaico	°
$\alpha$	Inclinação do terraço	°
$I_v(z)$	Intensidade de turbulência	%
$I\&D+I$	Investigação, Desenvolvimento & Inovação;	
LES	Large Eddy Simulation	
$\rho$	Massa volúmica	Kg/ m <sup>3</sup>

$k\text{-}\varepsilon$ padrão	Modelo de turbulência	
NDP	Nationally Determined Parameters	
EN	Norma Europeia	
$Re$	Número de Reynolds	
$O$	Origem do sistema de eixos	m
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_\mu$	Parâmetros do modelo de turbulência	
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Parâmetros do modelo de turbulência	
$q_p$	Pressão dinâmica de pico	Pa
$q_b$	Pressão dinâmica de referência	Pa
$P$	Pressão estática	Pa
$w_e$	Pressão exercida pelo vento nas superfícies exteriores	N/ m <sup>2</sup>
$G_k, G_b$	Produção de energia cinética de turbulência	
RaNS	Reynolds averaged Navier-Stokes	
$K_s$	Rugosidade em altura	m
$\psi$	Sentido do vento	°
DNS	Simulação Direta	
$\varepsilon$	Taxa de dissipação turbulenta	m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>
$v_b$	Velocidade base do vento a 10 m do solo	m/s
$v_{b,0}$	Velocidade base fundamental do vento	m/s
$u^*$	Velocidade de fricção	m/s
$V$	Velocidade do vento	m/s
$U$	Velocidade média do escoamento	m/s
$v_m(z)$	Velocidade média do vento	m/s
$\nu$	Viscosidade cinemática	m <sup>2</sup> /s
$u_l$	Viscosidade laminar	m <sup>2</sup> /s
$\mu_t$	Viscosidade turbulenta	m <sup>2</sup> /s
$G, H, I$	Zonas do terraço segundo EC1	m

## Índice de Figuras

Figura 3.1 - Definição de zonas do terraço [15] .....	9
Figura 4.1 - Sentido de escoamento ( $\psi$ ) .....	11
Figura 4.2 - Condições de fronteira .....	12
Figura 4.3 - Campo da velocidade a) linhas de velocidade b).....	15
Figura 4.4 - Campos da pressão no edifício a) Zona de recirculação b) .....	16
Figura 4.5 - Gráfico da distribuição da pressão estática ( $P$ ) na cobertura.....	16
Figura 5.1 - Localização do painel fotovoltaico na cobertura .....	20
Figura 5.2 - Perfil de velocidades para $V = 19,2$ m/s .....	20
Figura 5.3 - Campo da velocidade para $V = 44,82$ m/s .....	21
Figura 5.4 - Convergência da solução .....	21
Figura 5.5 - $F_{res}$ na cobertura face a variação de velocidade .....	22
Figura 5.6 - Vetores da velocidade e pressão para $V = 44,8$ m/s a) <i>shear layer</i> b) .....	23
Figura 5.7 - Campo de velocidades para $V = 32,0$ m/s na presença de um painel FV .....	25
Figura 5.8 - Orientação da força resultante .....	26
Figura 5.9 - Campo de velocidade e pressão para uma $V = 32,0$ m/s no painel FV .....	29
Figura 5.10 - Campo da pressão e velocidade no modelo – $\psi = 180^\circ$ .....	31
Figura 5.11 - Gráfico de Comparação do EC1[15] com modelo final .....	33
 Figura A.1 - Soluções Martifer Solar .....	 41
Figura A.2 - Painéis Fotovoltaicos Flat Roof Martifer Solar .....	41
 Figura B.1 - Orientação dos eixos para localização do ponto de aplicação da força resultante na cobertura e no painel fotovoltaico .....	 42
Figura B.2 - Modelo final com platibanda .....	42
 Figura C.1 - Malha isotrópica não estruturada .....	 43
 Figura D.1 - Tipos de cobertura EC1[15].....	 44
Figura D.2 - Coeficientes de pressão por zona EC1[15] .....	45
Figura D.3 - Tipo de terreno EC1[15] .....	45

## Índice de Tabelas

Tabela 4.1 - Dimensões do volume de controlo .....	12
Tabela 4.2 - Estudo da dimensão dos elementos de malha .....	13
Tabela 4.3 - Estudo de malha no modelo calibração .....	14
Tabela 4.4 - Verificação de valores de $y^+$ .....	15
Tabela 5.1 - Definição da malha - Modelo final.....	19
Tabela 5.2 - $F_{res}$ na cobertura plana.....	22
Tabela 5.3 - Localização da $F_{res}$ na Cobertura .....	23
Tabela 5.4 - $F_{res}$ (N) na cobertura com um painel FV - $\psi = 0^\circ$ .....	24
Tabela 5.5 - Análise comparativa (%) entre $F_{res}$ na cobertura plana e $F_{res}$ na cobertura com um painel FV - $\psi = 0^\circ$ .....	24
Tabela 5.6 - Localização (m) da $F_{res}$ na cobertura com um painel FV - $\psi = 0^\circ$ .....	24
Tabela 5.7 - $F_{res}$ (N) na cobertura com um painel FV - $\psi = 180^\circ$ .....	25
Tabela 5.8 - Análise comparativa (%) entre $F_{res}$ na cobertura plana e $F_{res}$ na cobertura com um painel FV - $\psi = 180^\circ$ .....	25
Tabela 5.9 - Localização (m) da $F_{res}$ na cobertura com um painel FV - $\psi = 180^\circ$ .....	26
Tabela 5.10 - Força (N) na zona frontal do painel FV .....	27
Tabela 5.11 - Força (N) na zona da retaguarda do painel FV .....	27
Tabela 5.12 - $F_{res}$ (N) no painel FV - $\psi = 0^\circ$ .....	27
Tabela 5.13 - Localização (m) da $F_{res}$ no painel FV - $\psi = 0^\circ$ .....	27
Tabela 5.14 - Força (N) no topo do painel FV .....	28
Tabela 5.15 - Força (N) na retaguarda do painel FV .....	28
Tabela 5.16 - $F_{res}$ (N) no Painel FV - $\psi = 180^\circ$ .....	28
Tabela 5.17 - Localização (m) da $F_{res}$ no painel FV - $\psi = 180^\circ$ .....	29
Tabela 5.18 - Análise de resultados do modelo com platibanda .....	30
Tabela 5.19 - Localização (m) da $F_{res}$ na cobertura com platibanda e sem platibanda .....	31
Tabela 5.20 - Localização (m) da $F_{res}$ no painel FV na cobertura com platibanda e sem platibanda .....	31





## 1 Introdução

Presentemente, as técnicas de dimensionamento usadas para a caracterização dos fenómenos que ocorrem em coberturas planas baseiam-se em normas europeias designadas Eurocódigos. Estas últimas são baseadas em estudos teóricos e experimentais, tendo as mesmas um carácter generalista para as diversas aplicações. Alguns projetos assumem uma componente mais complexa sendo, por isso, necessário um estudo pormenorizado para o qual os métodos analíticos não são na maior parte das vezes viáveis porque envolvem escoamentos em regime turbulento. A aplicação *Ansys Fluent*, através dos seus modelos de turbulência, tem a capacidade de resolver as várias equações da quantidade de movimento, continuidade e energia pelas quais a dinâmica de fluidos se rege.

No âmbito da dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica na opção de Produção, Desenvolvimento e Engenharia Automóvel, foi apresentada uma proposta de trabalho por parte da Martifer Solar para o estudo do efeito do vento sobre painéis fotovoltaicos em coberturas.

## 1.1 Apresentação da Martifer Solar

A Martifer Solar S.A. é uma empresa situada na Zona Industrial de Oliveira de Frades, Portugal. Constituída em 1990, tem uma forte liderança no mercado fotovoltaico nacional e internacional. Apresenta soluções FV 360°, que englobam as seguintes fases do processo: Desenvolvimento, Consultoria Financeira, Gestão do Projeto, Produção de equipamento Solar FV, Construção, Operação e Manutenção (O&M).

Este projeto foi desenvolvido no departamento de Investigação, Desenvolvimento e Inovação (I&D+I) da Martifer Solar. Este gabinete é composto por uma equipa que promove a criação de produtos em diversos segmentos de negócio: Solo, Instalações em coberturas, BIPV/Integração arquitetónica, Micro / Minigeração, Off-Grid e Parques de estacionamento (cf. Anexo A – Figura A.1).

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho consistiu na simulação do escoamento do vento sobre um painel fotovoltaico com várias inclinações na cobertura de um edifício exposto a diversos níveis de velocidade.

A análise do EC1[15] bem como das técnicas numéricas disponíveis na aplicação *Ansys Fluent* foram efetuadas de forma a obter os valores das forças resultantes e a sua localização no painel fotovoltaico.

## 1.3 Organização do relatório

A dissertação está organizada em seis capítulos, em que no primeiro se explica o local de realização do projeto e os seus objetivos iniciais.

No segundo capítulo, faz-se a apresentação das equações fundamentais e do modelo de turbulência usado na análise do problema proposto.

O terceiro capítulo, aborda o EC1[15] e secções relativas à análise de coberturas. Pois, nesta fase, torna-se necessário delimitar as zonas do telhado em estudo e as pressões exercidas pelo vento nas superfícies exteriores.

No quarto capítulo, é realizado um modelo de calibração que permite aferir a sensibilidade dos resultados aos parâmetros numéricos. Após este conhecimento, proceder-se-á à criação do domínio, à geração da malha e às opções possíveis de alteração na aplicação *Ansys Fluent*. Os campos de velocidades e pressões foram analisados de modo a ter uma percepção dos fenómenos que ocorrem na cobertura.

No quinto capítulo, trata-se da modelação final. O painel fotovoltaico será submetido a várias inclinações e velocidades do vento de forma a obter a força resultante e o seu respectivo ponto de aplicação para cada uma das simulações, ilustrada através dos campos de pressão e velocidade.

A dissertação termina com o capítulo seis, que reúne as conclusões principais e sugere trabalhos futuros com base nos resultados obtidos.

## 2 Equações fundamentais – Modelo computacional

### 2.1 Introdução

As equações de quantidade de movimento, continuidade e energia são as equações pelas quais a dinâmica de fluidos se orienta. A turbulência devido à sua natureza aleatória resulta numa resolução por via analítica muitas vezes impraticável apesar das várias tentativas que têm surgido para a sua descrição. As aproximações do fenómeno são obtidas através de resoluções numéricas, cujo refinamento está dependente dos requisitos do computador. Para o cálculo numérico dos escoamentos turbulentos são usados modelos de turbulência baseados em métodos como LES (*Large Eddy Simulation*) e RaNS (*Reynolds averaged Navier-Stokes*) pois tornam-se mais simplificados em comparação com as equações governativas que se baseiam em métodos de simulação direta (DNS). Pelo processo de RaNS, todas as escalas de turbulência são modeladas num único modelo e uma variação suave da média de velocidades e campos de pressões podem ser obtidos. Contudo, o processo médio introduz termos desconhecidos na equação de transporte, tensões e fluxos de Reynolds, que precisam de ser dados pela escolha apropriada do modelo de turbulência.

A leitura do *Ansys Fluent Help* torna-se uma ajuda imprescindível nesta análise, contribuindo com linhas de orientação fundamentais na escolha dos vários parâmetros.

## 2.2 Equações governativas

### 2.2.1 Conservação da Massa – Equação da continuidade

A equação da continuidade é a forma matemática da conservação da massa, quando aplicada a um fluido num escoamento, podendo ser definida como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) = 0 \quad (2.1)$$

em que  $\rho$  é a massa volúmica e  $U_i$  a velocidade aplicando-se para um escoamento compressível.

Quando o escoamento se apresenta incompressível,  $\partial \rho / \partial t \approx 0$ , as variações de massa são desprezáveis tomando a equação da continuidade a forma seguinte:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

### 2.2.2 Equação de quantidade de movimento

A segunda lei de Newton estabelece que para sistemas a taxa de variação temporal da quantidade de movimento do sistema é igual à soma das forças externas que atuam no sistema. A substituição do tensor das tensões viscosas pela relação entre a tensão e taxa de deformação para um fluido Newtoniano, onde as propriedades físicas são independentes da direção considerada, resulta na seguinte equação do balanço da quantidade de movimento Navier-Stokes:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (2.3)$$

Desenvolvendo a equação (2.3), obtemos a equação segundo três componentes:

Em x,

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.4)$$

Em y,

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.5)$$

Em  $z$ ,

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.6)$$

## 2.3 Modelo de turbulência

### 2.3.1 Modelo $k$ - $\varepsilon$ padrão

O modelo  $k$ - $\varepsilon$  padrão é um dos modelos de turbulência mais usados sendo caracterizado pela sua economia, robustez e precisão para uma grande variedade de fluxos turbulentos. Este modelo é um dos pertencentes ao método RaNS - *Reynolds averaged Navier-Stokes* e é modelado através das equações de transporte da energia cinética turbulenta ( $k$ ) e da sua taxa de dissipação ( $\varepsilon$ ).

A modelação da viscosidade turbulenta é dada por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (2.7)$$

A energia cinética turbulenta,  $k$ , e a taxa de dissipação,  $\varepsilon$ , são obtidas através das seguintes equações de transporte [5]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.9)$$

onde:

$G_k$  Produção de energia cinética de turbulência resultante da média dos gradientes sendo obtida por:

$$G_k = - \rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad (2.10)$$

$G_b$  Produção de energia cinética de turbulência devido à flutuação;

$Y_M$  Contribuição da dilatação flutuante na turbulência compressível para a taxa de dissipação;

$\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  Número de Prandtl para  $k$  e  $\varepsilon$ , respetivamente;

$S_k$  e  $S_\varepsilon$  Parâmetros a definir pelo utilizador.

$$C_{1\varepsilon} = 1,44; \quad C_{2\varepsilon} = 1,92; \quad C_\mu = 0,09; \quad \sigma_k = 1,0; \quad \sigma_\varepsilon = 1,3.$$

### **3 Abordagem ao Eurocódigo**

#### **3.1 Introdução**

Segundo Carlos Pina [8], os Eurocódigos Estruturais constituem um conjunto de Normas Europeias (EN) que devem ser tidas em conta nos projetos de estruturas de edifícios bem como noutras obras a nível de engenharia civil.

Neste projeto, consideraram-se as NP EN, uma vez que se trata da tradução portuguesa das várias partes do Eurocódigo e dos seus respetivos Anexos. Estes últimos definem os Parâmetros Determinados a nível Nacional (NDP – Nationally Determined Parameters), mantendo-se em aberto segundo os critérios nacionais.

Os Eurocódigos permitem uma uniformização da regulamentação bem como uma facilidade na troca de serviços de engenharia e ferramentas de projeto.

O Eurocódigo para a ação sobre estruturas é o EN 1991 – Eurocódigo 1 - Ação em estruturas, sendo este dividido em dez secções:

- EN 1991-1-1: Pesos volúmicos, pesos próprios e sobrecargas
- EN 1991-1-2: Ações em estruturas expostas ao fogo
- EN 1991-1-3: Ações da neve
- EN 1991-1-4: Ações do vento
- EN 1991-1-5: Ações térmicas
- EN 1991-1-6: Ações durante a construção
- EN 1991-1-7: Ações de acidente
- EN 1991-2: Ações de tráfego em pontes
- EN 1991-3: Ações devidas a gruas e equipamentos
- EN 1991-4: Ações em silos e reservatórios

Para o presente estudo, teve-se em consideração a norma NP EN 1991-1-4: Ações do vento.

### 3.2 Definição de velocidades

Para o cálculo da velocidade média do vento a uma altura acima do solo, segundo o Eurocódigo, é necessário ter em conta alguns fatores como a rugosidade do terreno, a orografia e a velocidade de referência do vento. A velocidade de referência do vento,  $v_b$ , deve ser calculada de acordo com:

$$v_b = C_{dir} \times C_{season} \times v_{b,0} \quad (3.1)$$

onde:

$v_b$  é a velocidade base do vento a 10 m do solo, para um terreno de categoria II;

$v_{b,0}$  é a velocidade base fundamental do vento;

$C_{dir}$  é o fator de direção (valor recomendado 1.0);

$C_{season}$  é o fator de época (valor recomendado 1.0).

A definição da velocidade base do vento permite definir a velocidade média do vento a uma altura acima do solo através da seguinte expressão:

$$v_m(z) = C_r(z) \times C_0(z) \times v_b \quad (3.2)$$

em que:

$C_0(z)$  é o fator de orografia assumindo este um aumento em zonas onde existe, por exemplo, colinas e falésias;

$C_r(z)$  é o fator de rugosidade que tem em conta a variação da velocidade média do vento na localização do obstáculo dependendo esta da altura acima do nível do solo e da rugosidade do terreno a barlavento da construção. Através da análise do EC1[15], este refere que o fator de rugosidade se baseia num perfil de velocidades logarítmico dado pela seguinte equação:

$$C_r(z) = k_r \times \ln \frac{z}{z_0} \quad \text{para } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (3.3)$$

$$C_r(z) = C_r(z_{min}) \quad \text{para } z \leq z_{min} \quad (3.4)$$

sendo  $k_r$  o coeficiente do terreno que depende da rugosidade do terreno  $z_0$ .

$$k_r = 0,19 \times \frac{z_0^{0.07}}{z_{0,II}} \quad (3.5)$$

$z_0$  assume-se como o comprimento de rugosidade;

$z_{min}$  altura definida no Anexo D (Figura D.3) a partir da qual se considera que a velocidade se apresenta constante;

$z_{max}$  representa o valor máximo que contempla o EC1 sendo considerado igual a 200 metros.



### 3.3 Turbulência do vento

Segundo o EC1[15], a intensidade de turbulência do vento pode ser calculada por:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{C_{0(z)} \times \ln(z/z_0)} \quad \text{para } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (3.6)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \quad \text{para } z \leq z_{min} \quad (3.7)$$

no qual  $k_I$  representa o coeficiente de turbulência com um valor recomendado de 1.

### 3.4 Pressão dinâmica de pico

A pressão dinâmica de pico à altura  $z$  pode ser caracterizada pela seguinte fórmula:

$$q_p = [1 + 7 \times I_v(z)] \times \frac{1}{2} \times \rho \times v_m^2(z) = C_e(z) \times q_b \quad (3.8)$$

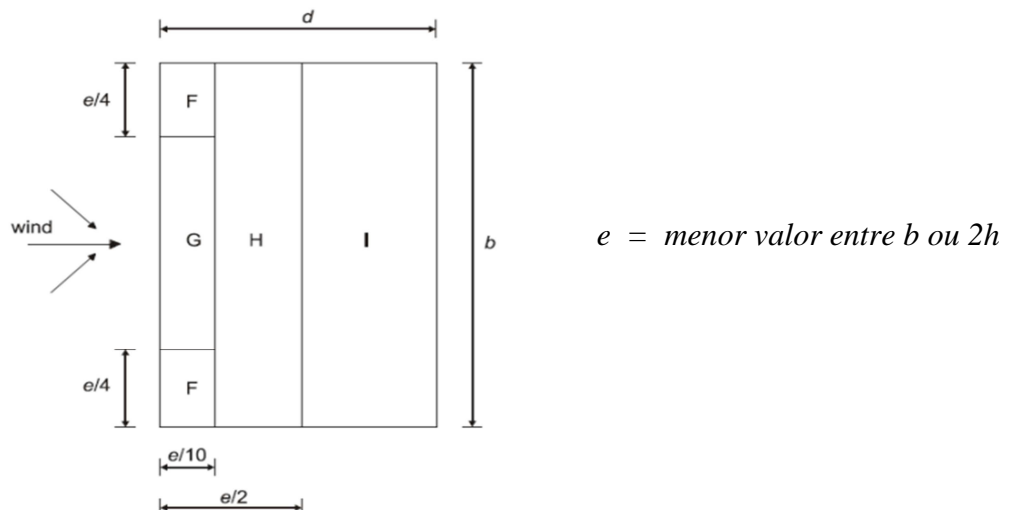
onde a massa volúmica do ar  $\rho$  tem um valor de  $1,25 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_e(z)$  é o coeficiente de exposição.

A pressão dinâmica de referência é caracterizada por:

$$q_b = \frac{1}{2} \times \rho \times v_b^2 \quad (3.9)$$

### 3.5 Coeficientes de pressão em terraços

Para a definição dos coeficientes de pressão em terraços, a inclinação ( $\alpha$ ) da cobertura tem de estar compreendida entre  $-5^\circ < \alpha < 5^\circ$ . O EC1[15] permite a divisão da cobertura de um edifício em forma de paralelepípedo por várias zonas, definindo localmente os coeficientes de pressão. A divisão da geometria a considerar em terraços está representada através da Figura 3.1, considerando  $e$  como o menor valor entre a largura  $b$  ou duas vezes a altura do edifício  $h$ . Os coeficientes de pressão em terraços variam conforme o tipo de cobertura aplicada e área carregada (cf. Anexo D -Figura D.2).



**Figura 3.1** - Definição de zonas do terraço [15]

## 4 Modelo Calibração

### 4.1 Introdução

A aplicação *Ansys Fluent* oferece uma grande variedade de ferramentas desde a construção de malhas (*Icem CFD*) até poderosos modelos de turbulência, tornando a análise o mais realista possível.

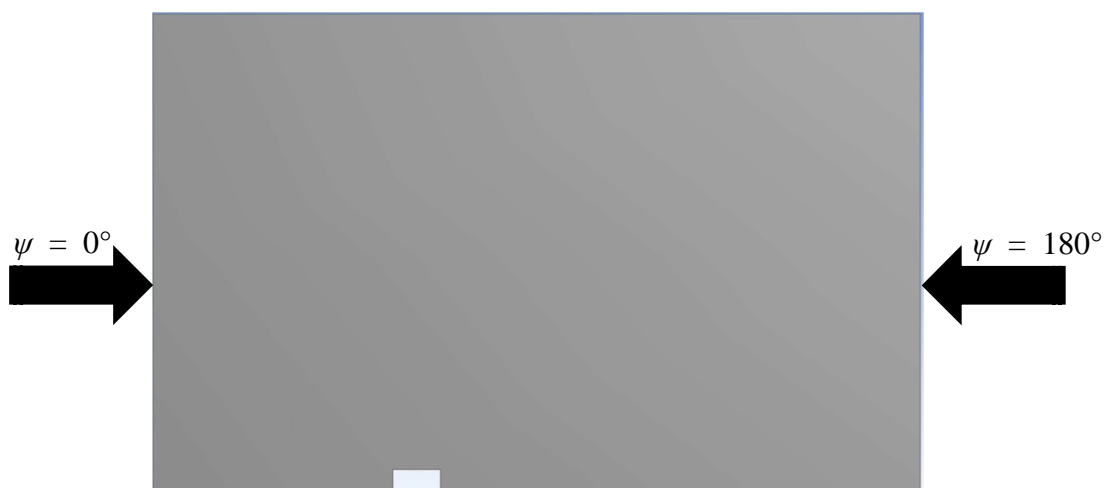
Esta parte do projeto promove a aproximação aos programas que foram utilizados bem como a aquisição de sensibilidade relativamente a cada um deles. Foi usado, neste modelo de calibração, apenas o edifício, sem nenhum painel fotovoltaico, de modo a serem perceptíveis os fenómenos que ocorrem em redor do mesmo. Para a resolução de um estudo com recurso a uma análise fluido dinâmica, foi necessário considerar determinados parâmetros e defini-los previamente para se proceder a uma análise estruturada. A calibração foi estruturada nas seguintes etapas onde se definiram:

- Geometria e condições de escoamento: altura do edifício, dimensão da cobertura, sentido e velocidade do vento;
- Volume de controlo: estudo e modelação *2D* do domínio, usando o *software Rhinoceros*;
- Tipo de malha: geração de malha em *Icem CFD*, efeito da dimensão da malha e diversos refinamentos com base nos resultados obtidos;
- Condições de fronteira: definição das condições de fronteira;
- Modelo de turbulência: escolha do modelo de turbulência;
- Análise de resultados: campos de velocidades e pressões.

## 4.2 Pré-processamento

### 4.2.1 Sentido e intensidade do vento

Para o estudo do modelo de calibração foi utilizada uma velocidade do vento de  $V = 35$  m/s com um sentido de  $\psi = 0^\circ$  representada na seguinte Figura 4.1:



**Figura 4.1** - Sentido de escoamento ( $\psi$ )

### 4.2.2 Volume de controlo e condições de fronteira

A definição do volume de controlo é um dos parâmetros que mais influencia o tempo de análise uma vez que um volume extenso poderá levar a tempos de convergência elevados sem ganhos significativos na precisão dos resultados. De modo a otimizar o tempo de computação, foram definidas várias constantes (cf. Tabela 4.1) que permitiram uma modelação apropriada às dimensões do edifício. Sendo assim, estipulou-se que o comprimento de entrada seria dez vezes a altura do edifício e o de saída vinte vezes. O comprimento do telhado assumiu-se como duas vezes a altura do edifício e a altura do volume de controlo como vinte vezes.

O comprimento de saída necessitou de ser superior ao de entrada devido ao efeito de esteira. Pois, o desenvolvimento do efeito de esteira tem de se dar no volume de controlo caso contrário obtém-se resultados irrealistas devido ao fenómeno de ‘*reversed flow*’, (obtido pela definição das condições fronteira).

Alguns modelos anteriores ao de calibração foram realizados de modo a garantir que estas dimensões do volume de controlo não interferissem com as condições de escoamento que se pretendia. Apesar desta pré-definição inicial de valores face ao volume de controlo que se criou, é possível que o mesmo volume tenha de ser alterado devido a condições de escoamento diferentes e às diversas inclinações do painel. Isto torna o processo iterativo nesta primeira abordagem, sendo necessário verificar com especial atenção o desenvolvimento do escoamento ao longo do volume de controlo.

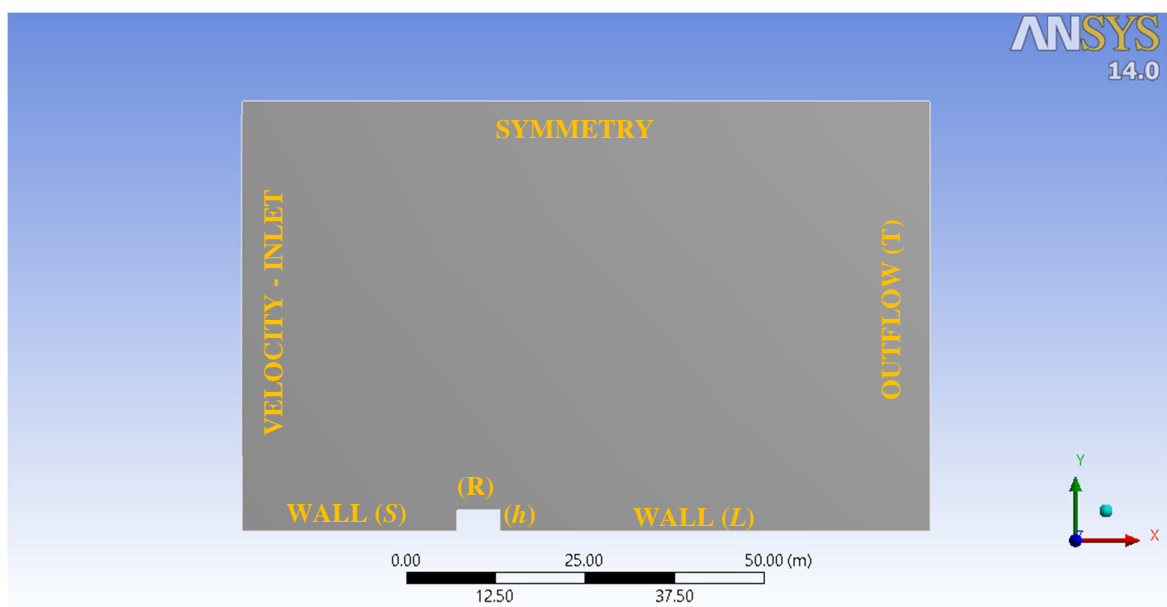
**Tabela 4.1** - Dimensões do volume de controlo

<i>Zona</i>	<i>Dimensões (m)</i>
<i>S</i>	$10 * h$
<i>h</i>	$3$
<i>L</i>	$20 * h$
<i>T</i>	$20 * h$
<i>R</i>	$2 * h$

O *Ansys Fluent* exigiu a definição das condições de fronteira para cada análise realizada de modo a ser obtido o escoamento adaptado a cada situação de estudo. A leitura do *Ansys Help* [5] e a consulta de vários artigos ([1] e [2]), permitiram a definição de vários parâmetros adequados ao objeto em estudo.

Para a superfície de entrada ‘*Inlet*’, optou-se por definir a velocidade de entrada do escoamento como *Velocity-Inlet*, atribuindo-se um perfil de velocidades uniforme. Relativamente à fronteira de saída ‘*Outlet*’, admitiu-se como *Outflow* fazendo este uma extrapolação das condições a partir do interior do volume escolhido. As restantes zonas como a altura, a zona a barlavento e sotavento do edifício foram definidas como *Wall* onde se verificou a condição de não escorregamento. O topo do volume de controlo foi admitido como *Symmetry* devido à geometria de interesse e o padrão de fluxo da solução já ser o esperado, obtendo-se assim, um espelho de simetria da zona interior. A Figura 4.2 permite uma visualização das condições de fronteira atribuídas ao domínio em estudo.

Foi utilizado o modelo de turbulência *k-ε* padrão associado a uma formulação estacionária, isto é, independente do tempo.

**Figura 4.2** - Condições de fronteira

#### 4.2.3 Tipo de malha e critério de convergência

Na definição da malha a utilizar, foi considerada a otimização do binário refinamento / tempo de computação, onde por simplicidade se optou por representar apenas o edifício. Utilizou-se um tipo de malha isotrópica não estruturada (cf. Anexo C - Figura C.1), sendo efetuados refinamentos locais de modo a obter a melhor precisão. Esta análise foi realizada tendo sempre como principal preocupação as limitações do computador utilizado. O refinamento a montante do edifício deveu-se ao desenvolvimento do escoamento desde a entrada até ao obstáculo e a jusante de igual forma devido aos efeitos de esteira presentes. Durante este processo, foi estudada a influência do refinamento da malha quer a nível local, quer global na precisão dos resultados. O estudo final da dimensão dos elementos de malha do edifício encontra-se discriminado na Tabela 4.2.

O critério de convergência geral para os valores residuais foi assumido como  $10^{-5}$ , podendo em alguns casos serem reduzidos até  $10^{-7}$ .

**Tabela 4.2** - Estudo da dimensão dos elementos de malha

<i>Malha</i>	<i>Domínio Geral</i> (m)	<i>R</i> (m)	<i>H</i> (m)	<i>S</i> (m)	<i>L</i> (m)	<i>Nós</i>
1	1	0,03	0,03	0,03	0,03	44 620
2	0,3	0,06	0,06	0,3	0,3	68 794
3	0,3	0,01	0,01	0,3	0,3	80 428
4	0,3	0,01	0,01	0,1	0,1	85 196
5	0,3	0,01	0,01	0,03	0,03	109 528

#### 4.2.4 Distância adimensional wall $y^+$

O valor de  $y^+$  é um número adimensional como o número de Reynolds,  $Re$ , que verifica a influência das células junto à parede consoante estas sejam laminares ou turbulentas. Este valor permite a verificação da correta representação da camada limite turbulenta pela primeira camada de volumes junto da parede.

Podemos definir a equação relativa ao  $y^+$  como:

$$y^+ = \frac{u^* y}{\nu} \quad (4.1)$$

onde  $\nu$  é a viscosidade cinemática,  $y$  é a distância do centro do elemento à parede e  $u^*$  é a velocidade de fricção.

Os valores de  $y^+$  para os escoamentos turbulentos como acontece neste caso de estudo devem localizar-se entre  $30 < y^+ < 300$ , tendo por base o estudo realizado por *Salim et. Al* [14].

#### 4.2.5 Intensidade da turbulência

Pode ser caracterizada a intensidade da turbulência,  $I$ , como a razão do desvio quadrático médio da flutuação da velocidade,  $u'$ , com a velocidade média do escoamento,  $U$ . Um valor de aproximadamente 1% é usado para definir intensidade da turbulência baixa e para intensidades elevadas, utilizam-se valores superiores a 10 %. A intensidade de turbulência é representada pela seguinte equação:

$$I = \frac{u'}{U} \quad (4.2)$$

O valor usado para a intensidade de turbulência foi de 10%, assumido por defeito pelo *Fluent*.

#### 4.2.6 Rácio de viscosidade turbulenta

Segundo o *Fluent Help* [5], o rácio de viscosidade turbulenta,  $u_t/u_l$ , é diretamente proporcional ao número de Reynolds turbulento. Este rácio relaciona a viscosidade turbulenta,  $u_t$ , com a viscosidade laminar  $u_l$ . Tipicamente os parâmetros de turbulência são definidos entre:

$$1 < \frac{u_t}{u_l} < 10 \quad (4.3)$$

O rácio de viscosidade turbulenta definido por defeito pelo *Fluent* é de 10.

### 4.3 Pós-processamento

#### 4.3.1 Análise de malha

Foi possível confirmar através do estudo de malha (cf. Tabela 4.3) e com base em estudos anteriores, como o de *Raciti Castelli et. al* [1], que a variação do tamanho dos respectivos elementos da malha e refinamentos locais pouco alteraram os resultados finais. Através desta análise, verifica-se que um melhor refinamento a montante, local e a jusante do edifício não influenciam os valores da força resultante, no entanto aumentam o tempo das iterações tanto como o tempo para a convergência. Apesar do refinamento considerado não influenciar significativamente a precisão dos resultados, é importante ser considerado devido ao desenvolvimento do escoamento como pode ser visto na seção 4.3.3.

**Tabela 4.3** - Estudo de malha no modelo calibração

<i>Malha</i>	<i>Iterações</i>	<i>F<sub>res</sub></i>	<i>Tempo</i>
		(N)	(MIN)
1	4 729	-3 810	51
2	3 844	-4 030	52
3	3 984	-3 979	118
4	4 313	-3 914	120
5	7 463	-3 995	204

#### 4.3.2 Análise de $y^+$

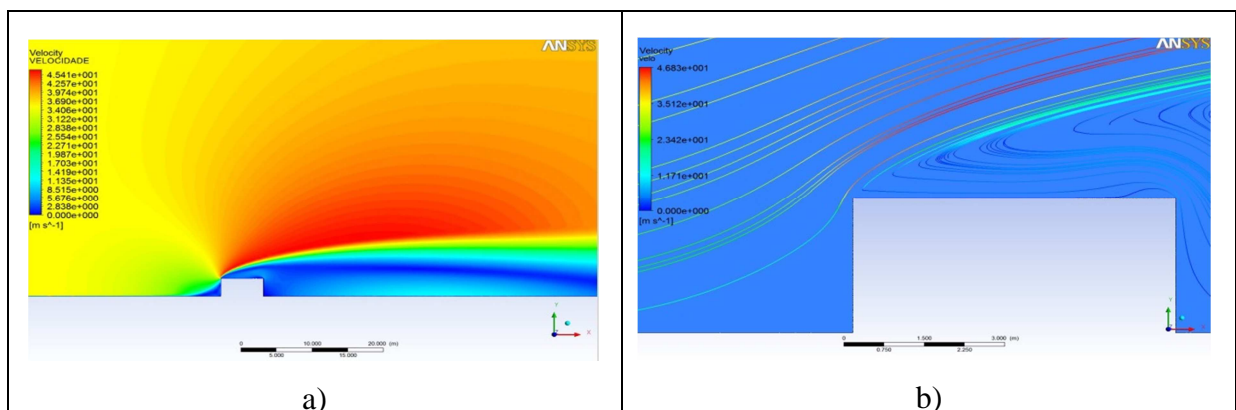
O valor de  $y^+$  dá uma orientação para a adequabilidade do tipo de modelo de turbulência admitido bem como da definição dos seus parâmetros de análise. Para as malhas que não cumpriram estes requisitos, foram obtidos valores excessivos de  $y^+$  na ordem de  $10^3$ . Considera-se que a malha número 4 apresenta o devido rigor, uma vez que na zona onde o refinamento foi elaborado, os resultados estão compreendidos entre  $40 < y^+ < 150$  (cf. Tabela 4.4). O *Ansys Fluent* dá a oportunidade de adaptar este critério automaticamente através da sua função *Adapt Yplus*, regulando a composição da malha em estudo. Neste caso, a criação de cada malha e refinamento foi efetuada manualmente no *software Icem CFD*, de forma a conferir maior sensibilidade e controlo dos vários parâmetros nos quais assenta a sua modelação.

**Tabela 4.4** - Verificação de valores de  $y^+$

Malha	$30 < y^+ < 300$
1	Não cumpre
2	Não cumpre
3	Pouco rigoroso
4	Rigoroso
5	Rigoroso

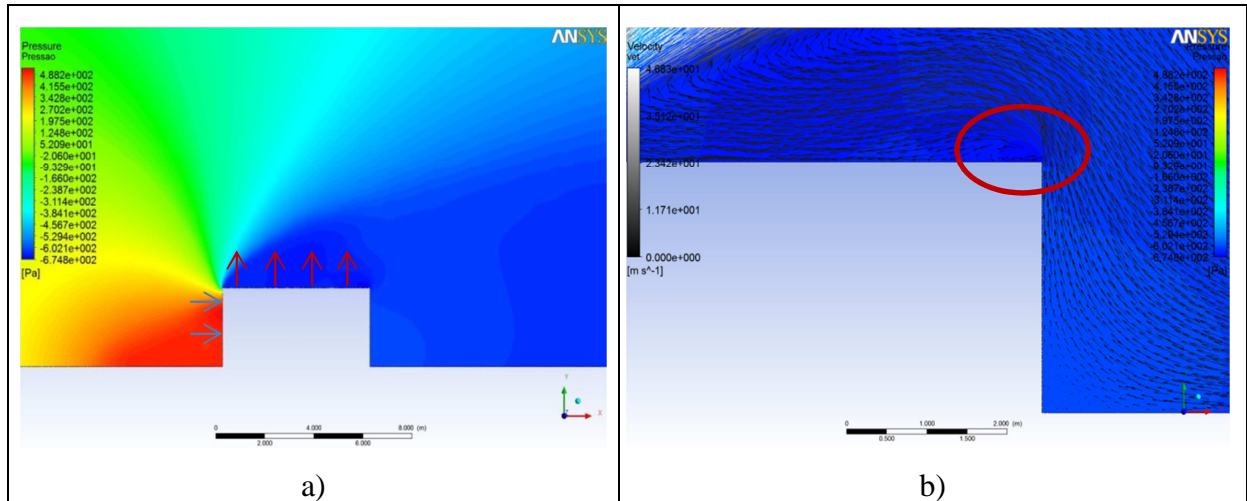
#### 4.3.3 Campos de velocidade e pressão

Após o estudo anterior dos vários parâmetros, foi possível proceder à análise do escoamento do vento sobre as várias zonas, dando especial relevo à cobertura do edifício. A Figura 4.3 a) demonstra que a zona de separação da camada limite está bem definida, afetando principalmente a zona envolvente e posterior, na qual se procedeu a um refinamento mais cuidadoso na seção 4.2.3. A zona da esteira é também visível devido à sua dimensão, admitindo-se um valor de dez a quinze vezes a altura do edifício. As linhas de velocidade da Figura 4.3 b) demonstram que na zona de recirculação, junto à cobertura, a velocidade é muito baixa ou quase nula.



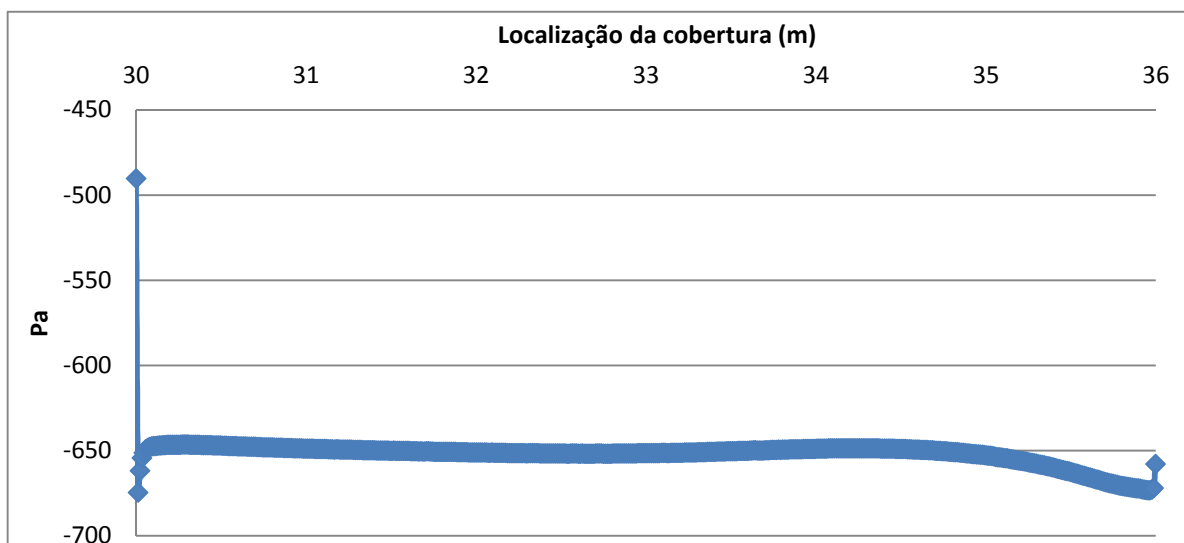
**Figura 4.3** - Campo da velocidade a) linhas de velocidade b)

A pressão estática no topo do edifício assume um carácter distinto da pressão que atua na face frontal do edifício. Enquanto a face frontal está submetida a forças de pressão no sentido do edifício, na cobertura atuam forças com sentido contrário (ascendentes), onde pode ser perceptível através da representação do sentido das mesmas por setas na Figura 4.4 a). Nos campos de pressão, verifica-se que a mesma sofre pequenas flutuações de valor, mantendo-se praticamente constante ao longo da cobertura. Na conjugação dos vetores de velocidade e campos da pressão na Figura 4.4 b), é visível um ligeiro aumento em módulo da pressão no final da cobertura devido à zona de recirculação que se encontra assinalada com um círculo a vermelho.



**Figura 4.4** - Campos da pressão no edifício a) Zona de recirculação b)

Com base na análise computacional, o *Ansys Fluent* permitiu a exportação de resultados sobre a forma de um relatório, sendo possível uma análise recorrendo a gráficos mais detalhados sobre cada zona. A Figura 4.5 demonstra a distribuição da pressão que ocorre na cobertura face à velocidade de incidência do vento a  $V = 35$  m/s.



**Figura 4.5** - Gráfico da distribuição da pressão estática ( $P$ ) na cobertura



#### 4.4 Síntese

O estudo dos parâmetros do modelo de calibração, conferiram uma maior sensibilidade aos mesmos, sendo determinante na análise dos vários programas utilizados desde a modelação ao pré-processamento e pós-processamento. Verificou-se que o dimensionamento é extremamente importante, pois caso se descure a sua definição pode conduzir quer à ocorrência de erros expressivos quer a um tempo de processamento elevado. O uso de *Ansys Fluent Help* [5] permitiu definir as condições de fronteira mais apropriadas a serem usadas na modelação final.

A análise de sensibilidade do refinamento da malha permitiu concluir que um refinamento excessivo conduz a tempos de convergência elevados sem uma melhoria significativa de resultados. Apesar disso, é fundamental ter em conta um refinamento mais cuidadoso nas zonas envolventes ao obstáculo de modo a respeitar os valores de  $y^+$ . O critério de convergência geral para os residuais foi estabelecido em  $10^{-5}$  e todas as análises convergiram nesta primeira abordagem.

Os resultados obtidos pelo *Ansys Fluent* permitiram verificar graficamente o escoamento e a validação dos parâmetros previamente definidos.

## 5 Modelação Final

### 5.1 Introdução

Nesta parte do projeto efetuou-se a análise do caso em estudo. Para esse efeito, colocou-se o painel fotovoltaico com vários ângulos de inclinação na cobertura de um edifício sujeito a ventos de sentidos e intensidades diferentes.

Esta parte pode ser dividida em duas secções principais:

- A fase de pré-processamento tem por base a definição e escolha das variáveis que influenciam a solução final. Nesta etapa, o modelo de calibração assume-se como uma importante ferramenta de auxílio.
- A fase de pós-processamento, em primeiro lugar, consiste na verificação correta dos *inputs* admitidos numa fase de pré-processamento. De seguida, é analisada a força resultante e o seu ponto de aplicação, tanto na cobertura como no painel fotovoltaico. O uso de platibanda foi alvo de estudo apenas para uma inclinação do painel conjuntamente a uma velocidade do vento, de modo a verificar as vantagens e desvantagens da sua integração. Por fim, foram comparados os resultados obtidos na cobertura plana (com arestas vivas) através das simulações numéricas (*Fluent*) com os valores do EC1 [15].

## 5.2 Pré-processamento

### 5.2.1 Descrição do problema

As simulações do escoamento sobre a cobertura e o painel englobaram as direcções do vento  $\psi = 0^\circ$  e  $\psi = 180^\circ$  visíveis no Anexo B (cf. Figura B.1), para um edifício com a altura de três metros. Para esse efeito, foi utilizado um painel fotovoltaico com as seguintes dimensões: 1,639 x 0,982 x 0,035 m (cf. Anexo A - Figura A.2). A área considerada para a análise do painel fotovoltaico foi de  $A = 1,639 \text{ m}^2$  devido a ser um escoamento bidimensional. Este foi analisado para inclinações de  $\lambda = 10^\circ$ ,  $\lambda = 20^\circ$  e  $\lambda = 30^\circ$ , quando a velocidade do vento no topo do edifício atingiu valores de  $V = 19,2 \text{ m/s}$ ,  $V = 32,0 \text{ m/s}$ ,  $V = 44,8 \text{ m/s}$ . As velocidades foram definidas conforme os cálculos baseados no EC1[15] em que foram consideradas as velocidades fundamentais do vento  $v_{b,0} = 15 \text{ m/s}$ ,  $v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$  e  $v_{b,0} = 35 \text{ m/s}$ .

### 5.2.2 Definição do volume de controlo

O domínio final baseou-se no modelo de calibração em que a altura do edifício é igual a três metros e a cobertura duas vezes esse valor. O comprimento a montante do edifício é de dez vezes a altura do obstáculo e a jusante de vinte vezes. Através da Tabela 4.1 é possível verificar todas as dimensões consideradas.

### 5.2.3 Definição de malha e critério de convergência

A malha gerada para a análise do modelo final tem por base a dimensão dos elementos da número 4, assumindo os valores para o domínio geral e local conforme a Tabela 4.2. Sendo assim, cada inclinação  $\lambda$  deu origem a uma nova malha (cf. Tabela 5.1). O critério de convergência geral assumido para os valores residuais foi igual a  $10^{-5}$ .

**Tabela 5.1** - Definição da malha - Modelo final

<i>Análise</i>	<i>Nós</i>	<i>Elementos</i>
Cobertura Plana	85 196	167 672
$\lambda = 10^\circ$	87 148	171 264
$\lambda = 20^\circ$	88 265	173 514
$\lambda = 30^\circ$	88 079	173 142

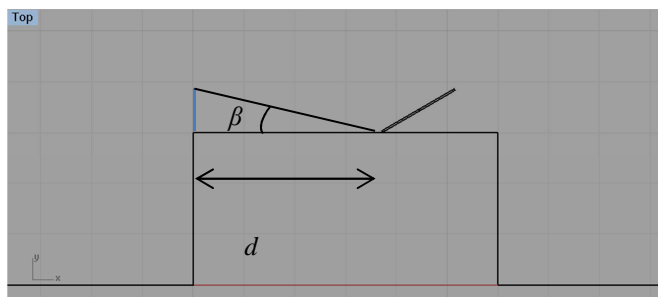
### 5.2.4 Definição das condições de fronteira

Com base no estudo do modelo de calibração, as condições de fronteira adotadas apresentam-se como:

- *Inlet – Velocity Inlet*
- *Outlet – Outflow*
- Edifício – *Wall*
- Solo – *Wall*
- Topo do volume de controlo – *Symmetry*

### 5.2.5 Localização do painel fotovoltaico na cobertura

A localização do painel fotovoltaico na cobertura teve em conta o ângulo de sombreamento de  $\beta = 15^\circ$  existente entre obstáculos. Este ângulo evita o sombreamento entre painéis e define a distância a ser considerada. Para caracterizar o seu posicionamento assumiu-se a existência de um obstáculo com uma altura de um metro na zona inicial do terraço, indicado a azul na Figura 5.1. Com base neste procedimento, essa distância possui um valor de  $d = 3,73$  m.



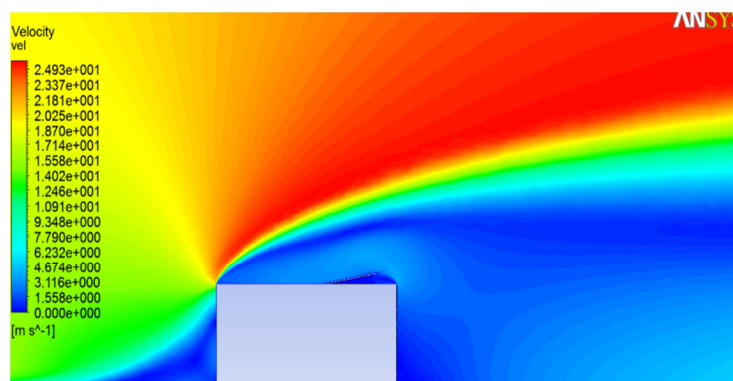
**Figura 5.1** - Localização do painel fotovoltaico na cobertura

### 5.2.6 Definição da força resultante e respectivo ponto de aplicação

A orientação da força resultante foi sempre perpendicular às superfícies que estão a ser alvo de análise. Com o intuito de uniformizar a localização do ponto de aplicação da força resultante, todos os valores obtidos tanto para a incidência do vento a  $\psi = 0^\circ$  como a  $\psi = 180^\circ$ , foram definidos tendo em conta o início da cobertura. O ponto  $O (0,0)$  assumiu-se como a origem, sendo o painel e a cobertura analisados segundo o sentido referido no respectivo Anexo B (cf. Figura B.1).

### 5.2.7 Perfil de velocidades

De modo a controlar a variação da velocidade em altura, a definição da condição de parede *Wall* no *Ansys Fluent* é importante, porque o parâmetro da rugosidade  $K_s$  baixo (próximo de zero) permite o aumento de velocidade pretendido e a obtenção da correta velocidade no topo do edifício. A Figura 5.2 demonstra o perfil de velocidades potencial obtido pelo *Ansys Fluent* antes do escoamento ser perturbado pelo edifício.

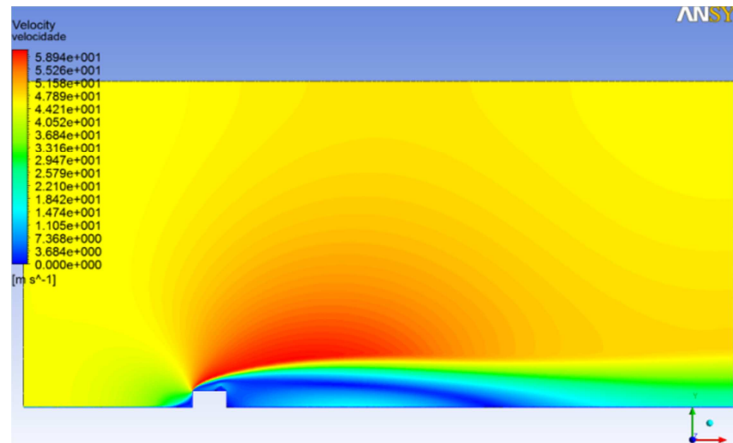


**Figura 5.2** - Perfil de velocidades para  $V = 19,2$  m/s

### 5.3 Pós-processamento

#### 5.3.1 Análise do volume de controlo

O volume de controlo mostrou-se bem definido para o caso extremo em que a velocidade máxima assume um valor de  $V = 44,8$  m/s. Verificou-se através da Figura 5.3 que o domínio a jusante do obstáculo é suficientemente longo para o desenvolvimento do escoamento sem alterar as suas condições de fluxo.

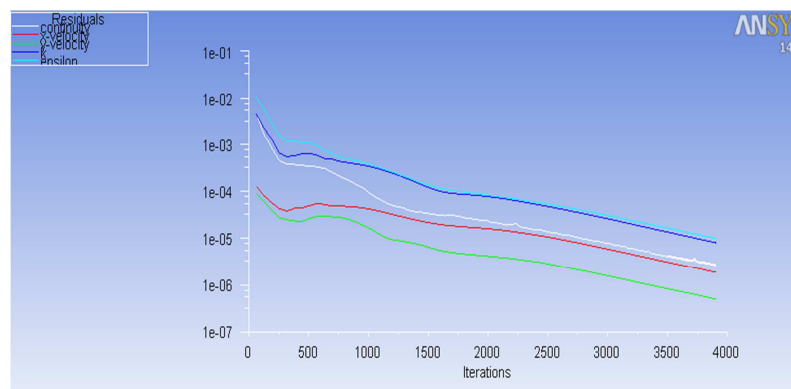


**Figura 5.3** - Campo da velocidade para  $V = 44,82$  m/s

#### 5.3.2 Verificação de $y^+$ e critério de convergência

Nas diversas análises de escoamento e inclinações do painel FV, os valores de  $y^+$  situaram-se entre  $70 < y^+ < 250$ . A criação de malhas adaptadas a cada situação em estudo permitiu obter os resultados pretendidos.

O critério de convergência geral para valores residuais de  $10^{-5}$  mostrou estabilidade à solução, ultrapassando até em algumas análises o valor assumido. Cada uma das vinte e quatro simulações necessitou de um tempo médio de quatro horas para convergir onde foram necessárias 4000 iterações (cf. Figura 5.4).



**Figura 5.4** - Convergência da solução

### 5.3.3 Fenómenos na cobertura plana

Numa primeira fase, foi analisada a cobertura plana, isto é, sem a presença do painel FV. Os resultados obtidos nessa análise serviram como base de comparação de modo a ser perceptível se a presença de um painel na cobertura altera os valores da força resultante e do seu ponto de aplicação.

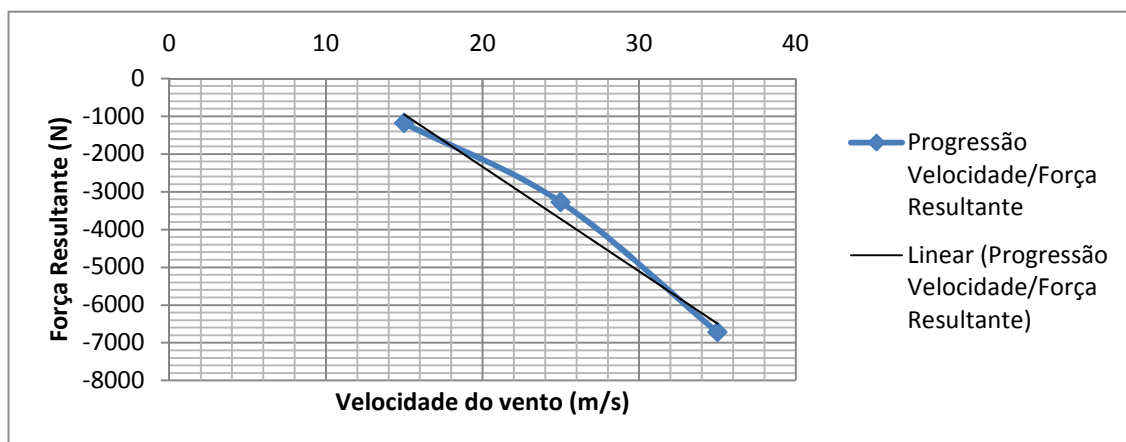
- *Análise para  $\psi = 0^\circ$  e  $\psi = 180^\circ$*

O *Ansys Fluent* permitiu através de relatórios de análise de resultados obter a força resultante existente na cobertura. No caso da cobertura plana, os resultados assumiram valores iguais, tanto para  $\psi = 0^\circ$  como para  $\psi = 180^\circ$ .

Comparando com o modelo de calibração, a zona da cobertura no modelo final é igualmente submetida a forças ascendentes ao longo de todo o seu domínio, dando assim origem a uma força resultante com o mesmo sentido. O aumento da força resultante face ao aumento da velocidade do vento como se verifica na Tabela 5.2, assume uma linha de tendência com um comportamento quadrático mas é possível entre os valores estudados aproximar a uma função linear, podendo ser observada através da Figura 5.5.

**Tabela 5.2 -  $F_{res}$  na cobertura plana**

<i>Velocidade do vento</i>	$F_{res}$
m/s	N
19,2	-1 187,0
32,0	-3 274,6
44,8	-6 724,4



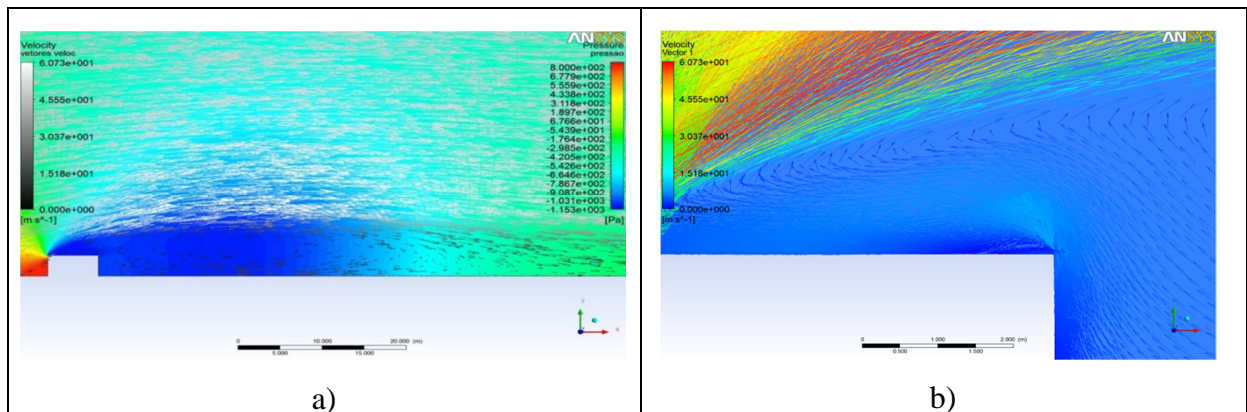
**Figura 5.5 -  $F_{res}$  na cobertura face a variação de velocidade**

Como demonstra a Tabela 5.3, a localização do ponto de aplicação da força resultante não está dependente da velocidade do vento e encontra-se a 3 metros, situando-se no ponto médio da cobertura.

**Tabela 5.3 - Localização da  $F_{res}$  na Cobertura**

<i>Velocidade do vento</i>	<i>Localização da <math>F_{res}</math> na cobertura plana</i>
m/s	m
19,2	3
32,0	3
44,8	3

Nos três casos analisados, foi verificado através dos campos da velocidade que a forma do escoamento segue um padrão semelhante e existe uma zona de recirculação a jusante do obstáculo. A conjugação gráfica entre os vetores de velocidade e pressão ilustrada na Figura 5.6, permitiu constatar que, na zona da esteira, o escoamento inverte o seu sentido, direcionando-se novamente para a zona de entrada. Isto deve-se à ação de um gradiente de pressão adverso. Uma vez que, a maior parte do fluxo se encontra sob essas condições tende a circular na zona da cobertura, intersetando-se de novo com o escoamento incidente. Nesta zona de contacto, as duas correntes paralelas de fluido encontram-se com velocidades diferentes dando origem ao fenómeno designado por camada de corte (*shear layer*). A extensão da esteira mostrou-se dependente da velocidade de escoamento, resultando para a velocidade máxima num comprimento de quinze vezes altura do edifício.



**Figura 5.6 - Vetores da velocidade e pressão para  $V = 44,8$  m/s a) *shear layer* b)**

▪ *Análise para  $\psi = 0^\circ$  com a presença do painel FV*

Para o caso do vento ser  $\psi = 0^\circ$ , verificaram-se valores da força resultante na cobertura idênticos quando comparados com os da cobertura plana (cf. Tabela 5.4). Essa diferença traduz-se num desvio positivo máximo de 2,9% visível na Tabela 5.5, podendo ser considerado desprezável visto a grande dimensão da cobertura.

**Tabela 5.4** -  $F_{res}$  (N) na cobertura com um painel FV –  $\psi = 0^\circ$

m/s	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$
19,2	-1 199	-1 196	-1 222
32,0	-3 299	-3 304	-3 355
44,8	-6 755	-6 765	-6 784

**Tabela 5.5** - Análise comparativa (%) entre  $F_{res}$  na cobertura plana e  $F_{res}$  na cobertura com um painel FV –  $\psi = 0^\circ$

m/s	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$
19,2	1,0	0,8	2,9
32,0	0,8	0,9	2,4
44,8	0,5	0,6	0,9

O aumento da inclinação do painel, apresentou um efeito residual no ponto de aplicação da resultante mantendo-o sensivelmente a meio da cobertura como se pode constatar na seguinte Tabela 5.6.

**Tabela 5.6** - Localização (m) da  $F_{res}$  na cobertura com um painel FV –  $\psi = 0^\circ$

m/s	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$
19,2	3,0	2,98	2,92
32,0	3,0	2,99	2,94
44,8	3,0	2,99	2,96

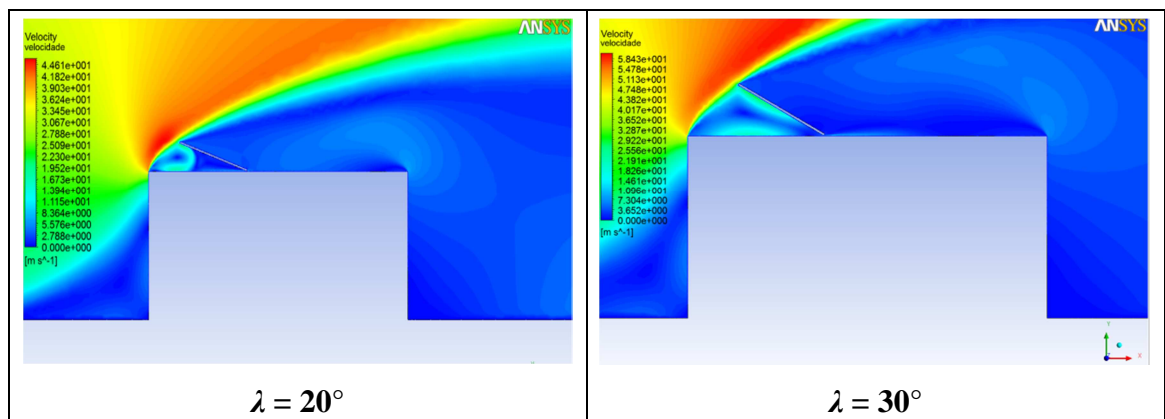


▪ *Análise para  $\psi = 180^\circ$  com a presença do painel FV*

Com a incidência do vento a  $\psi = 180^\circ$ , os efeitos ocorridos na cobertura apresentaram um comportamento distinto dos obtidos anteriormente.

Para inclinações superiores a  $\lambda = 20^\circ$ , inclusive, o painel FV interfere com uma zona do escoamento incidente, dando-se assim uma passagem de fluido para a secção inferior do painel. Gera-se assim uma zona de recirculação delimitada pela cobertura e pelo painel FV, como pode ser visto a título exemplificativo para  $\lambda = 20^\circ$ , na Figura 5.7. Neste caso, os valores da resultante representados na Tabela 5.7 quando comparados com os da cobertura plana, sofrem um aumento máximo de 16% para uma velocidade de  $V = 32,0$  m/s.

Para  $\lambda = 30^\circ$ , quando sujeito às várias intensidades do escoamento verifica-se uma diminuição máxima de 9% da resultante na cobertura (cf. Tabela 5.8). Devido à inclinação do painel fotovoltaico, este apresenta-se de uma forma quase perpendicular ao escoamento incidente como demonstra a Figura 5.7. Facto que origina a diminuição da velocidade ao longo da retaguarda do painel reduzindo assim a pressão negativa localizada entre o painel e a cobertura (cf. Anexo E).



**Figura 5.7** - Campo de velocidades para  $V = 32,0$  m/s na presença de um painel FV

**Tabela 5.7** -  $F_{res}$  (N) na cobertura com um painel FV -  $\psi = 180^\circ$

m/s	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$
19,2	-1 240	-1 356	-1 085
32,0	-3 376	-3 891	-3 076
44,8	-6 592	-7 711	-6 109

**Tabela 5.8** - Análise comparativa (%) entre  $F_{res}$  na cobertura plana e  $F_{res}$  na cobertura com um painel FV -  $\psi = 180^\circ$

m/s	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$
19,2	4	12	-9
32,0	3	16	-6
44,8	-2	13	-9

A localização do ponto de aplicação das forças resultantes (cf. Tabela 5.9), para a inclinação de  $\lambda = 20^\circ$ , assumiu um deslocamento superior face às restantes podendo atingir valores na ordem de 0,40 metros para a velocidade de  $V = 44,8$  m/s. Esta variação para a zona final da cobertura deveu-se à zona de recirculação anteriormente referida.

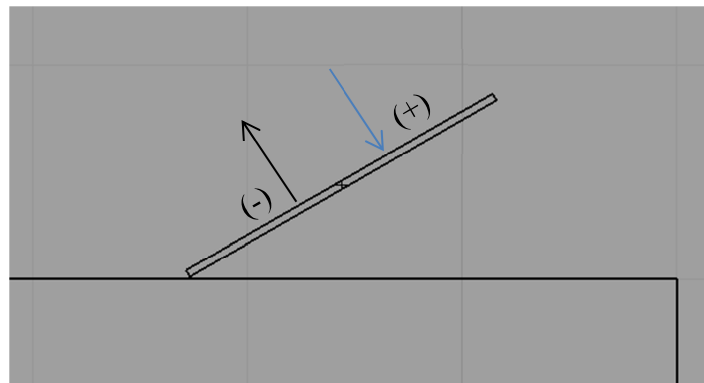
**Tabela 5.9** - Localização (m) da  $F_{res}$  na cobertura com um painel FV –  $\psi = 180^\circ$

m/s	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$
19,2	3,10	3,32	2,85
32,0	3,10	3,38	2,90
44,8	3,06	3,40	2,93

#### 5.3.4 Fenómenos no painel fotovoltaico

Realizado o estudo da cobertura, o ponto seguinte consistiu numa análise particular às forças que atuam no painel FV. Esses valores permitiram a caracterização da força resultante e consequentemente do seu ponto de aplicação.

É necessário a compreensão da orientação da força resultante que atua sobre o painel fotovoltaico para se proceder a uma análise correta. Conforme a Figura 5.8, considerou-se que a presença de uma força resultante com a orientação do vetor de cor azul (sinal positivo), provoca uma pressão no painel no sentido da cobertura. A força resultante, que se apresenta com o sinal negativo, origina por sua vez forças no painel com o sentido do vetor preto, isto é, provoca o arrancamento do mesmo.



**Figura 5.8** - Orientação da força resultante

- Análise do painel FV –  $\psi = 0^\circ$

Com a inclinação do painel FV de  $\lambda = 10^\circ$ , as forças a que foram sujeitas a zona frontal e de retaguarda são semelhantes (cf. Tabela 5.10 e Tabela 5.11), provocando esse equilíbrio uma força resultante quase inexistente como se constata na Tabela 5.12 e nos campos da pressão do Anexo E. Com o aumento da inclinação e da velocidade, a força gerada em cada uma das faces tornou-se mais expressiva tendendo a aumentar na face frontal.

**Tabela 5.10** - Força (N) na zona frontal do painel FV

m/s	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$
19,2	-331	-338	-356
32,0	-911	-933	-972
44,8	-1 865	-1 903	-1 944

**Tabela 5.11** - Força (N) na zona da retaguarda do painel FV

m/s	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$
19,2	-330	-321	-313
32,0	-912	-891	-873
44,8	-1 869	-1 841	-1 795

**Tabela 5.12** -  $F_{res}$  (N) no painel FV –  $\psi = 0^\circ$

m/s	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$
19,2	-1	-17	-43
32,0	1	-41	-99
44,8	4	-62	-150

O ponto de aplicação da força resultante localizou-se a um metro do bordo do painel FV em quase todas as simulações, existindo assim pequenas flutuações de valor, como é visível na Tabela 5.13.

**Tabela 5.13** - Localização (m) da  $F_{res}$  no painel FV –  $\psi = 0^\circ$

m/s	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$
19,2	1,1	0,95	0,90
32,0	1,12	0,95	0,92
44,8	1,14	1,0	0,95

▪ Análise do painel FV –  $\psi = 180^\circ$

Para inclinações de  $\lambda = 10^\circ$  e  $\lambda = 20^\circ$ , o valor da força resultante no painel FV foi positiva sendo o mesmo pressionado em direção à cobertura (cf. Tabela 5.16). Analisando a Figura 5.9, para uma inclinação de  $\lambda = 30^\circ$ , verifica-se que a distribuição da pressão na face frontal é constante e superior à da retaguarda, em toda a extensão do painel. Assim, o sinal da força resultante passa a negativo, estando o painel exposto ao efeito de arrancamento.

**Tabela 5.14** - Força (N) no topo do painel FV

m/s	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$
19,2	-323	-309	-325
32,0	-891	-844	-898
44,8	-1 749	-1 646	-1 757

**Tabela 5.15** - Força (N) na retaguarda do painel FV

m/s	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$
19,2	-373	-470	-240
32,0	-998	-1 420	-721
44,8	-1 929	-2 863	-1 480

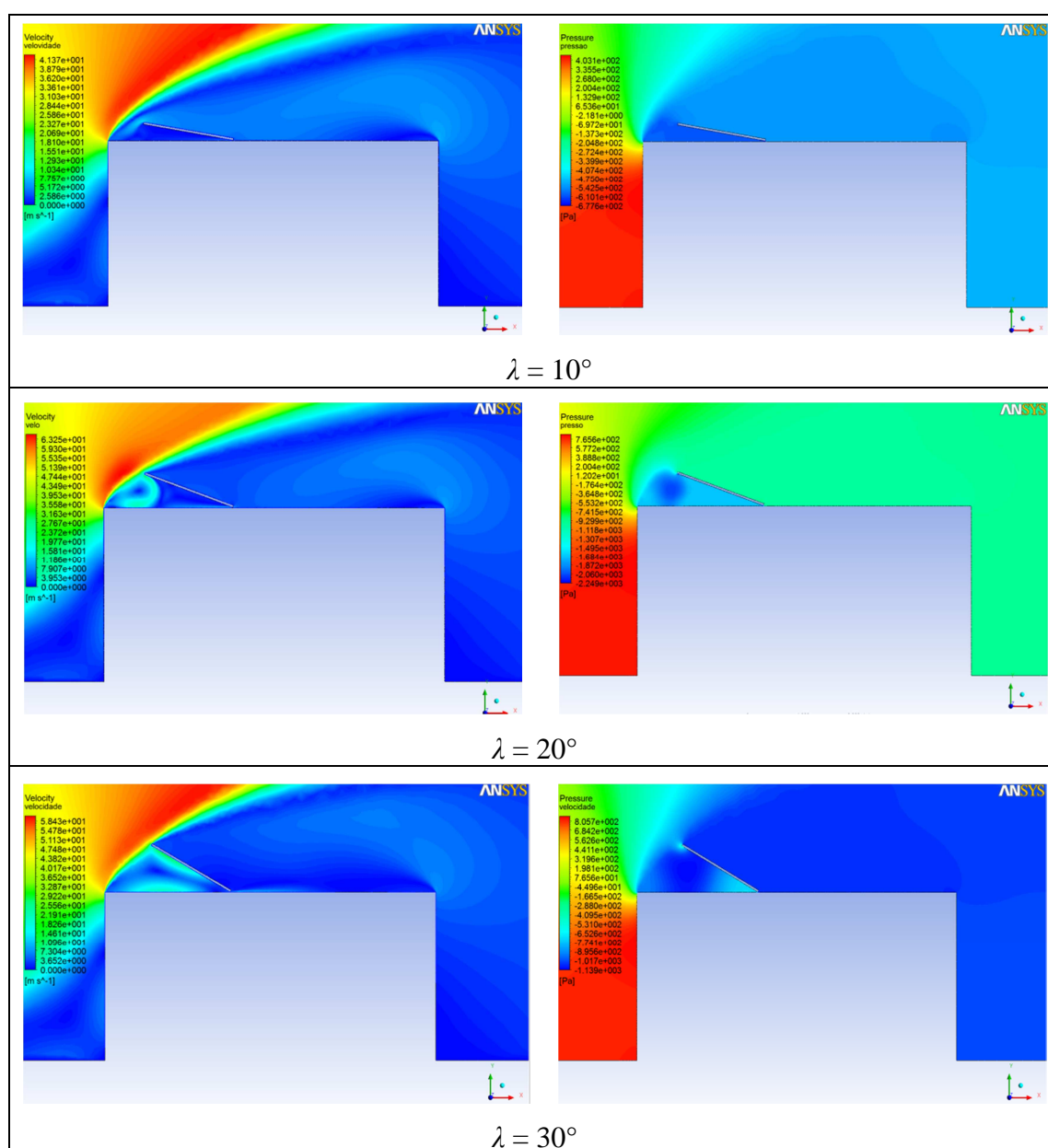
**Tabela 5.16** -  $F_{res}$  (N) no Painel FV -  $\psi = 180^\circ$

m/s	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$
19,2	50	162	-85
32,0	107	576	-178
44,8	180	1 216	-276

Para uma inclinação de  $\lambda = 20^\circ$ , na parte inferior do painel FV, ocorreu um fenômeno localizado, já referido na análise da cobertura, onde se verificou uma zona de recirculação com extensão reduzida e velocidades superiores levando a maior pressões na mesma. Isto promoveu a deslocação da força resultante para uma área superior do painel como comprova a Tabela 5.17.

**Tabela 5.17** - Localização (m) da  $F_{res}$  no painel FV –  $\psi = 180^\circ$

m/s	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$
19,2	0,77	0,90	0,70
32,0	0,76	0,85	0,64
44,8	0,76	0,83	0,58



**Figura 5.9** - Campo de velocidade e pressão para uma  $V = 32,0$  m/s no painel FV

### 5.3.5 Inserção de platibanda

O uso de platibanda consiste numa parede, grade ou muro colocada acima dos limites com o intuito de servir de parapeito ou como elemento de corta fogo, cuja influência no escoamento é determinante.

Com o intuito de estudar o efeito da platibanda no modelo final, foi admitida uma velocidade do vento,  $V = 32,0$  m/s, com o painel fotovoltaico a  $\lambda = 30^\circ$  (cf. Tabela 5.18).

Limitou-se a extensão da platibanda ao limite geométrico imposto pelo EC1[15] de  $h_p/h = 0,1$ , perceptível no Anexo D (cf. figura D.2).

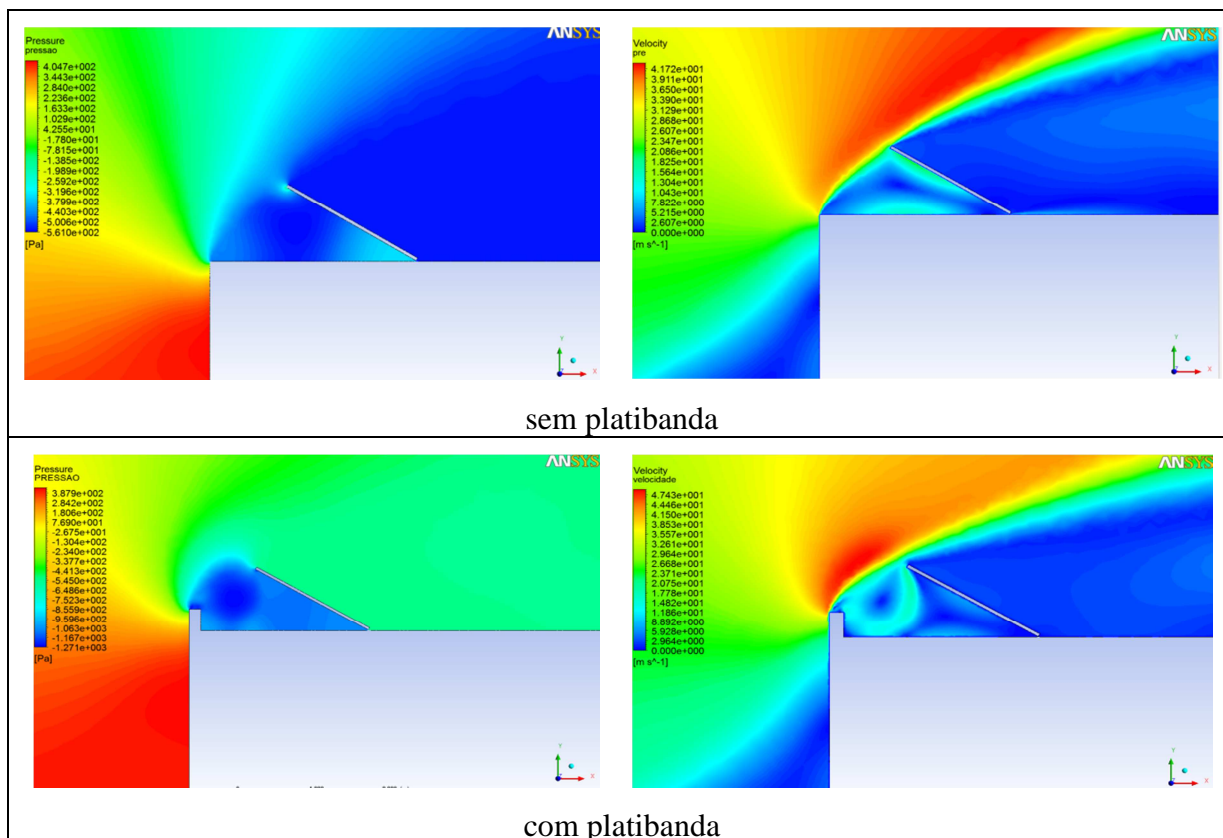
**Tabela 5.18** - Análise de resultados do modelo com platibanda

	<i>Sentido do vento</i> ( $\psi$ )	<i>Inclinação Painel FV</i> ( $\lambda$ )	<i>Z. Frontal Painel FV</i> (N)	<i>Z. Retaguarda Painel FV</i> (N)	<i>Força Res. Painel FV</i> (N)	<i>Força na Cobertura</i> (N)
SEM PLATIBANDA						
Cobertura plana	0°/180°	-	-	-	-	-3 275
Cobertura com Painel	0°	30°	-972	-873	-99	-3 355
Cobertura com Painel	180°	30°	-898	-721	-178	-3 076
COM PLATIBANDA						
Cobertura plana	0°/180°	-	-	-	-	-3 371
Cobertura com Painel	0°	30°	-1 017,3	-1 001	-16,3	-3 455
Cobertura com Painel	180°	30°	-895,8	-1 826,6	930,8	-4 275

O uso de platibanda quando o vento se apresenta como  $\psi = 0^\circ$  resulta numa redução do valor da força resultante no painel fotovoltaico em 84%. Neste caso, os valores na cobertura estão sujeitos a pequenas alterações, podendo mesmo ser desprezáveis.

O sentido do vento  $\psi = 180^\circ$  provocou no modelo com platibanda uma variação do sentido da força resultante no painel fotovoltaico e um aumento do valor da mesma.

A platibanda provocou uma elevação da zona da camada limite (cf. Figura 5.10), originando campos de velocidade e pressão semelhantes aos que ocorrem quando um painel fotovoltaico apresenta uma inclinação de  $\lambda = 20^\circ$  (cf. Figura 5.7).



**Figura 5.10** - Campo da pressão e velocidade no modelo –  $\psi = 180^\circ$

O ponto de aplicação da força resultante na cobertura com a presença do painel FV sofreu alterações apenas para ventos com sentido de  $\psi = 180^\circ$ . Nesta situação, ocorreu um deslocamento máximo de 0,56 metros (cf. Tabela 5.19). No caso do painel fotovoltaico, o ponto de aplicação da resultante deslocou-se para a parte superior (cf. Tabela 5.20) devido à presença de uma área com maiores pressões como demonstrado nos campos da Figura 5.10.

**Tabela 5.19** - Localização (m) da  $F_{res}$  na cobertura com platibanda e sem platibanda

	$30^\circ$ (platibanda)	$30^\circ$
Cobertura plana	3	3
Cobertura c/ painel – $\psi = 0^\circ$	3	2,9
Cobertura c/ painel – $\psi = 180^\circ$	3,5	2,94

**Tabela 5.20** - Localização (m) da  $F_{res}$  no painel FV na cobertura com platibanda e sem platibanda

	$30^\circ$ (platibanda)	$30^\circ$
Painel fotovoltaico – $\psi = 0^\circ$	1,05	0,92
Painel fotovoltaico – $\psi = 180^\circ$	0,84	0,64

### 5.3.6 Ansys Fluent Vs. EC1-4

O EC1[15] que caracteriza a ação dos ventos sobre estruturas, apenas permite a comparação das pressões e coeficientes de pressão com a cobertura sem a presença do painel fotovoltaico. Assim sendo, somente se pode comparar as pressões obtidas na cobertura plana.

Como foi realizada a modelação em  $2D$  e os fenómenos do EC1[15] são descritos em  $3D$ , algumas suposições devem ser consideradas de modo a ser possível a comparação.

Devido à largura  $b$  do modelo ter sido considerada infinita, automaticamente o valor de  $e$  é considerado duas vezes a altura do edifício e usados assim os coeficientes de pressão,  $c_{pe,10}$ .

Os coeficientes da zona  $F$  apenas se poderão comparar quando obtemos uma análise  $3D$ . No modelo criado, considerou-se as zonas  $G, H, I$  em que:

- $0 \text{ m} < G < 0,6 \text{ m}$ ;
- $0,6 \text{ m} < H < 3 \text{ m}$ ;
- $3 \text{ m} < I < 6 \text{ m}$

Os coeficientes de pressão na zona  $I$  do EC1[15] (cf. Anexo D - Figura D.2) apresentam um valor positivo ou negativo uma vez que se localiza junto da esteira. Dada a sua variabilidade apresentam valores um pouco imprevisíveis.

Para o cálculo da pressão exercida pelo vento nas superfícies exteriores,  $w_e$ , a expressão a usar é definida como:

$$w_e = q_p(z_e) \times c_{pe} \quad (5.1)$$

em que:

$q_p(z_e)$  pressão dinâmica de pico;

$z_e$  altura de referência para a pressão exterior, considerada  $h$ ;

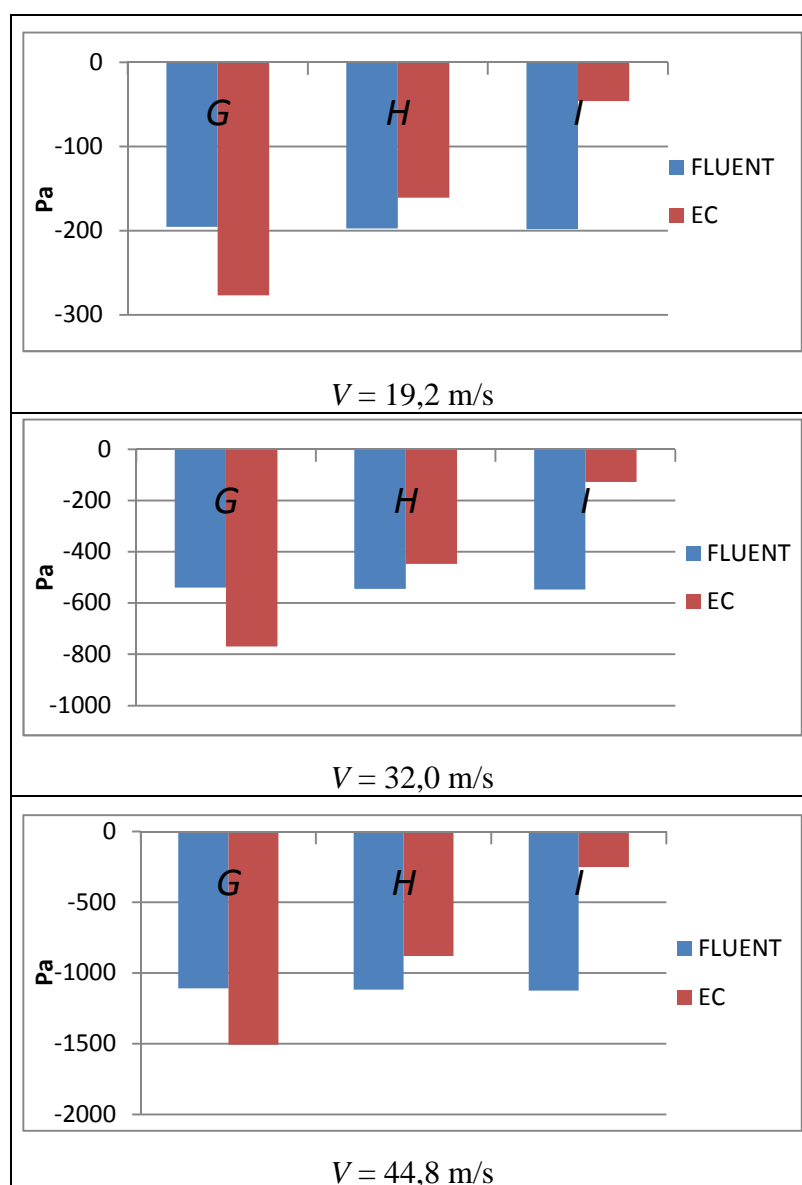
$c_{pe}$  coeficiente de pressão para a pressão exterior.



Os resultados numéricos para a pressão exercida pelo vento sobre a cobertura para a zona *G*, tiveram em conta as várias velocidades do vento e revelaram-se em média 27% inferiores ao EC1[15] (cf. Figura 5.11).

Na zona *H*, apesar das diferenças serem pequenas, os resultados numéricos apresentaram-se ligeiramente superiores face ao respectivo Eurocódigo.

Na zona *I*, onde os efeitos gerados pela esteira já referidos são importantes, existiu uma maior divergência de valores numericamente obtidos face ao EC1[15]. Estes valores calculados através do *Ansys Fluent* apresentam-se superiores em média 334% face ao Eurocódigo em análise.



**Figura 5.11** - Gráfico de Comparação do EC1[15] com modelo final

## 6 Conclusões e desenvolvimentos futuros

### 6.1 Conclusões

Esta dissertação apresenta os resultados da modelação bidimensional do efeito do vento sobre painéis fotovoltaicos em coberturas de edifícios, usando a aplicação comercial *Ansys Fluent*. Uma das vantagens principais destas aplicações é a melhor percepção do escoamento do ar em redor do painel fotovoltaico.

Resultados preliminares mostraram a necessidade de um domínio de grande dimensão para evitar o efeito de '*reversed flow*' e as alterações nas condições de escoamento. Além disso, verificou-se que uma malha excessivamente refinada não induzia melhores resultados mas tempos de convergência substancialmente superiores, devido ao custo computacional envolvido. Este aspeto apresentou-se como uma indicação de que a malha usada era suficientemente fina para a resolução deste problema e os resultados não sofrem de erros numéricos significativos. Em contrapartida, malhas com tamanhos de elementos superiores resultaram em distâncias adimensionais  $y^+$  elevadas, não respeitando a gama de valores pretendida.

Pode-se afirmar que a cobertura plana (sem a presença do painel fotovoltaico) tanto para um valor de  $\psi = 0^\circ$  ou  $\psi = 180^\circ$ , está apenas sujeita a forças ascendentes em toda a sua extensão. Conclui-se com base no estudo da cobertura que, o caso em que  $\psi = 180^\circ$  e o painel fotovoltaico com  $\lambda = 20^\circ$ , é o que causa maior influência nos resultados, aumentando a força resultante em 16% e deslocando o seu ponto de aplicação em 0,4 metros devido a um fenómeno local de recirculação de ar delimitado entre o painel FV e a cobertura. No entanto para  $\lambda = 30^\circ$  verifica-se uma diminuição da resultante na cobertura em 9%.

Analizadas as forças resultantes obtidas para o painel fotovoltaico, constatou-se que a incidência do vento  $\psi = 180^\circ$  é a que provoca maior instabilidade nos resultados. Pois, a variação do ângulo de  $\lambda = 20^\circ$  para  $\lambda = 30^\circ$  resulta numa inversão do sentido da força resultante e no aumento da mesma.

O uso de platibanda mostrou-se benéfico para  $\psi = 0^\circ$ , reduzindo o valor da força resultante no painel em 84%. No entanto, para  $\psi = 180^\circ$ , a colocação de um painel fotovoltaico junto à platibanda existente no final do edifício deverá ser evitada uma vez que potencia efeitos de recirculação de ar.

Na comparação com o EC1[15], os resultados das simulações numéricas com o uso do modelo  $k-\varepsilon$  *padrão* apresentaram valores superiores em 334%, relativamente à pressão exercida pelo vento na cobertura na zona I, onde a influência dos efeitos de esteira são predominantes.

## 6.2 Desenvolvimentos futuros

Como trabalho futuro, sugere-se o estudo tridimensional recorrendo a um edifício de maior dimensão com a colocação de sucessivos painéis fotovoltaicos e respeitando a distância de sombreamento. Dever-se-á ter em conta a colocação de elementos que obstruam o escoamento na zona livre do painel, evitando efeitos locais de recirculação de ar.

O melhoramento da malha e o estudo mais aprofundado do perfil de velocidades será um ponto a considerar numa nova análise deste tipo.

O ensaio em túnel de vento é um dos métodos mais utilizados nestes casos. As suas conclusões são uma mais-valia, auxiliando o reajuste entre aplicação numérica e o próprio túnel de vento.

O uso do modelo *LES* (Large Eddy Simulation) pode ser visto como algo vantajoso no estudo deste tipo de escoamentos turbulentos por apresentar uma melhor modelação na zona de separação e dos vórtices criados pelo obstáculo. Apesar da sua precisão, esta é conseguida devido a tempos de computação e computadores de custo mais elevado.



## 7 Referências e Bibliografia

- [1] Castelli, M., Toniato, S., Benini, E., (2012) “Numerical Simulation of the Aerodynamic Loads acting on top of the SMART Centre for PV Applications”;
- [2] Castelli, M., Castelli, A., Benini, E., Modeling, (2011), “Strategy and Numerical Validation of the Turbulent Flow over a two-Dimensional Flat Roof ,”, World Academy of Science, Engineering and Technology, Issue 79 (2011), pp. 461-467;
- [3] Ariff, M., Ariff, Salim, M., Cheah, S. (2009), “Wall Y+ Approach for dealing with turbulent flow over a surface mounted cube: Part 2 – High Reynolds Number”, Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Austrália;
- [4] Yoshie, R., Mochida, A., Tominaga, Y., Kataoka, H., Harimoto, K., Nozu, T., Shirasawa, T., Cooperative Project for CFD Prediction of Pedestrian Wind Environment in the Architectural Institute of Japan, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 95 (2007), 1551-1578;
- [5] FLUENT<sup>®</sup> User's Guide (2011), USA;
- [6] Camarinha, Ricardo M. de Matos (2009), “Ação Longitudinal do Vento em Edifícios Altos”, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, IST;
- [7] Mehrdad, S., Hangan, H., (2009), “Wind Loading on Solar Panels at Different Inclination Angles”, The Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, The University of Western Ontario, London, N6A 5B9, Ontario, Canada.
- [8] [www.Inec.pt/qpe/eurocodigos/seminario\\_lisboa/Situacao\\_Portugal\\_PORTO2010\\_CP.pdf](http://www.Inec.pt/qpe/eurocodigos/seminario_lisboa/Situacao_Portugal_PORTO2010_CP.pdf) último acesso: outubro 2012
- [9] Bruce R. Munson, Donald F. Young e Theodore H. Okiishi, “Fundamentals of Fluid Mechanics 4th ed.”, Edgard Blücher, Iowa – Estados Unidos da América;
- [10] <http://solar.fc.ul.pt/gazeta2006.pdf>, último acesso: outubro 2012,
- [11] [http://www.solenerg.com.br/files/monografia\\_cassio.pdf](http://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf), último acesso: novembro 2012

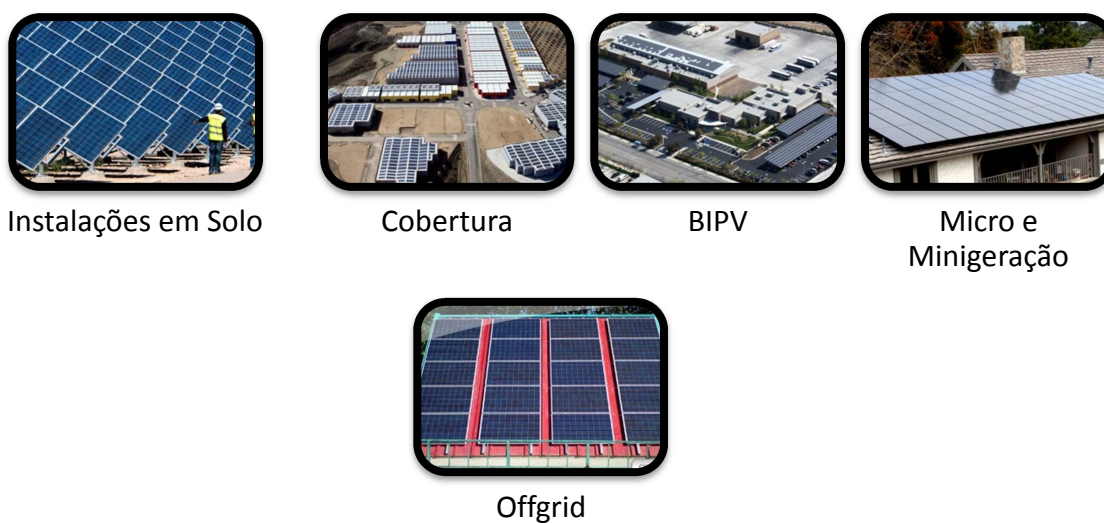
- [12] <http://www.ptvis.com/o-que-e-energia-fotovoltaica-electricidade-a-partir-do-sol/>, último acesso: novembro 2012
- [13] [http://www.apisolar.pt/images/stories/ER\\_Jun12.pdf](http://www.apisolar.pt/images/stories/ER_Jun12.pdf), último acesso: dezembro 2012
- [14] White, Frank M. (2002), “Fluid Mechanics – Fifth Edition”, McGraw-Hill, University of Rhode Island;
- [15] Eurocódigo 1 - Ações em estruturas - Parte 1-4: Ações gerais, Ações do vento – versão 2010
- [16] Jubayer, C.M., Hagan,H, (2012), “Wind Effects on Photovoltaic (PV) Panels – A CFD approach”, The Wind Engineering, Energy and Environment (WindEEE) Research Institute, Western University, London, ON



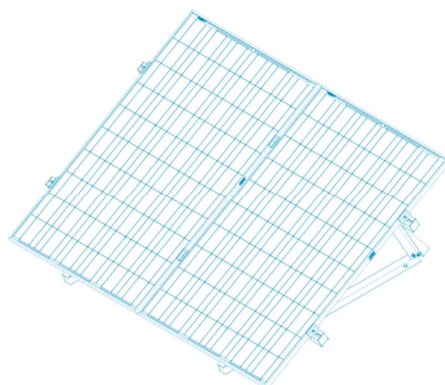
## **8 ANEXOS**



## ANEXO A: Soluções Martifer Solar

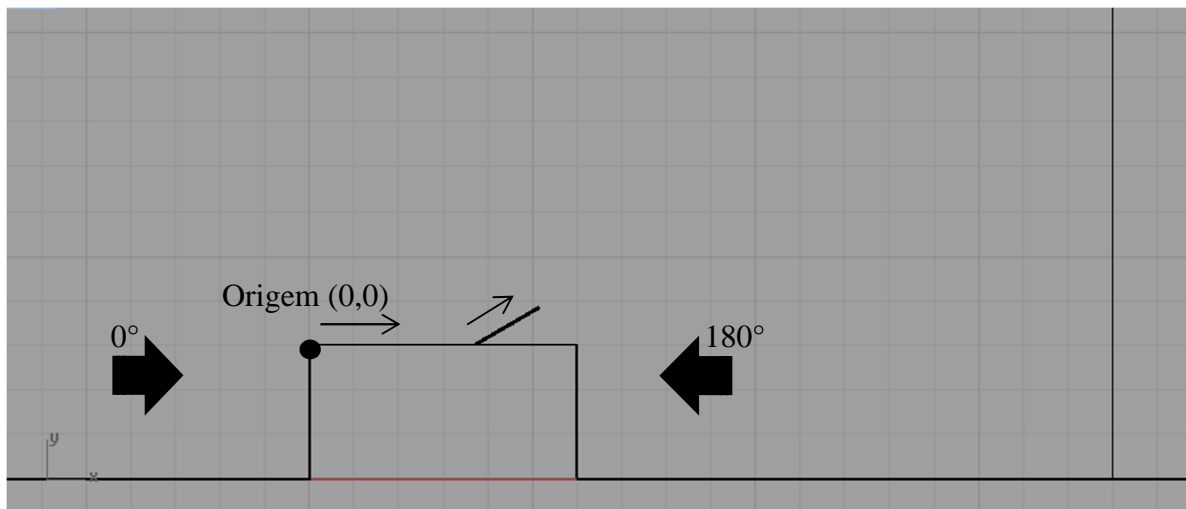


**Figura A.1** - Soluções Martifer Solar

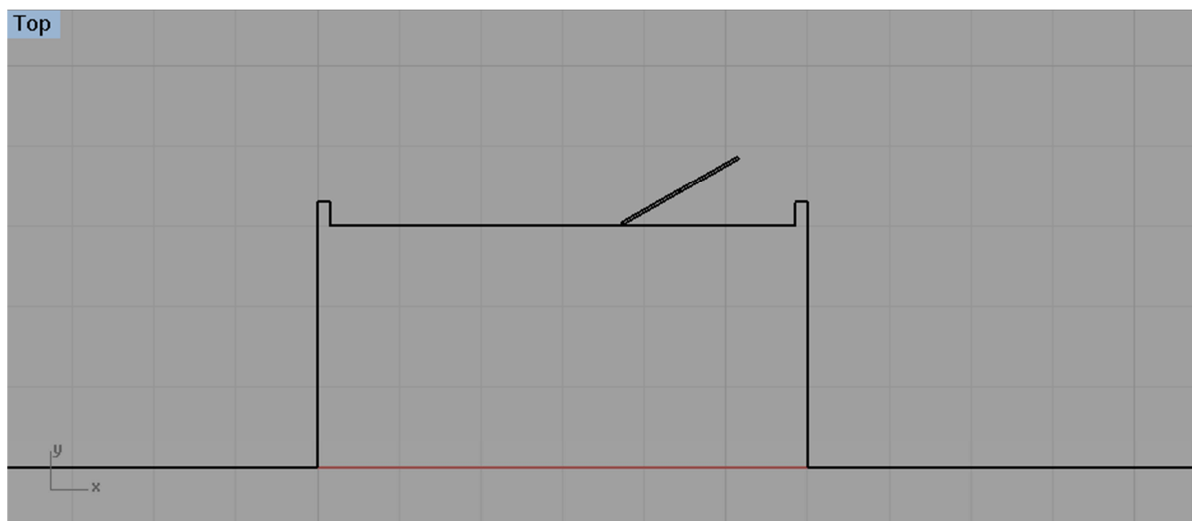


**Figura A.2** - Painéis Fotovoltaicos Flat Roof Martifer Solar

## ANEXO B: Orientação de eixos e modelos de apoio

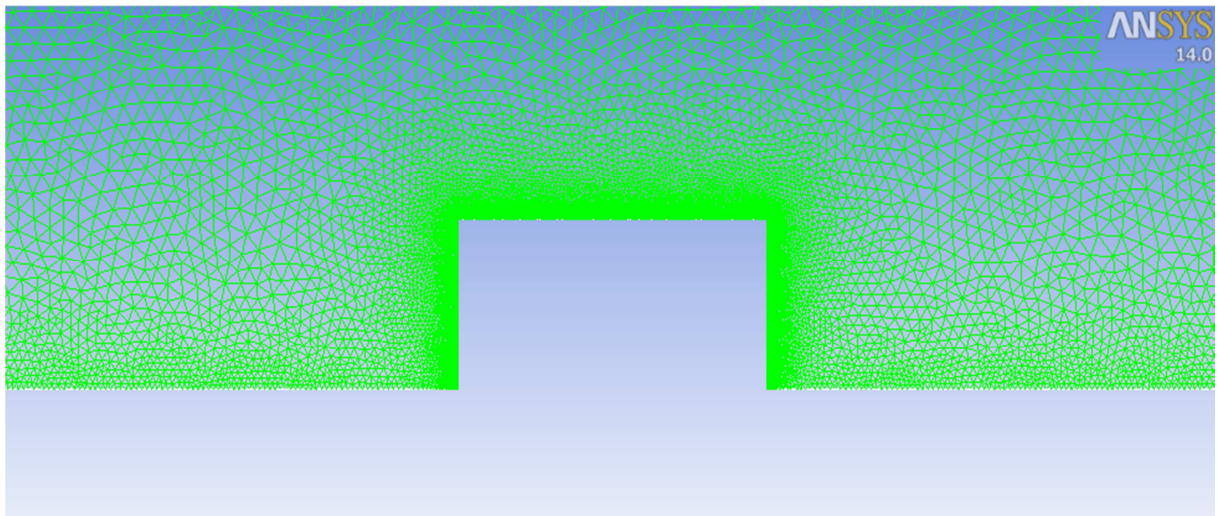


**Figura B.1** - Orientação dos eixos para localização do ponto de aplicação da força resultante na cobertura e no painel fotovoltaico



**Figura B.2** - Modelo final com platibanda

## ANEXO C: Tipo de malha

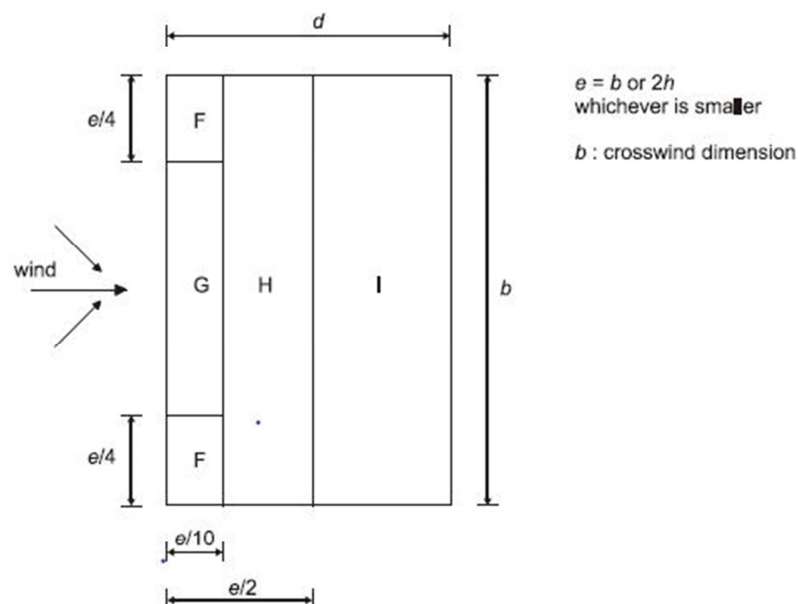
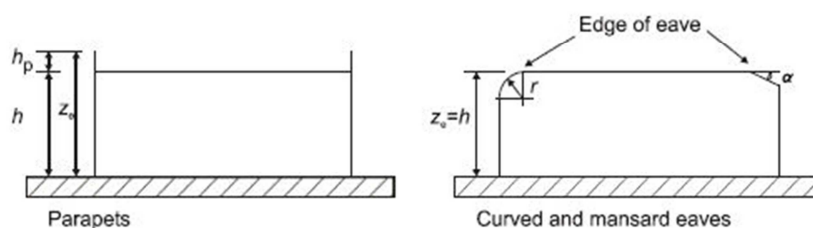


**Figura C.1** - Malha isotrópica não estruturada

## ANEXO D: Eurocódigo EC1-4

NP  
EN 1991-1-4  
2010

p. 43 de 162



### Legenda:

parapets	platibandas
edge of eave	topo do bordo
curved and mansard eaves	bordos arredondados ou amansardados
$e = b$ or $2h$ , whichever is smaller	$e =$ menor valor de entre $b$ e $2h$
crosswind dimension	dimensão transversal à direcção do vento

Figura 7.6 – Zonas em coberturas em terraço

Figura D.1 - Tipos de cobertura EC1[15]

Tipo de cobertura		Zona							
		F		G		H		I	
		$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$
Bordos em aresta viva		-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
Com platibanda	$h_p/h=0,025$	-1,6	-2,2	-1,1	-1,8	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
	$h_p/h=0,05$	-1,4	-2,0	-0,9	-1,6	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
	$h_p/h=0,10$	-1,2	-1,8	-0,8	-1,4	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
	$h_p/h=0,10$	-1,2	-1,8	-0,8	-1,4	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
	$h_p/h=0,10$	-1,2	-1,8	-0,8	-1,4	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
	$h_p/h=0,10$	-1,2	-1,8	-0,8	-1,4	-0,7	-1,2	+0,2	-0,2
Bordos arredondados	$r/h = 0,05$	-1,0	-1,5	-1,2	-1,8	-0,4	-0,4	+0,2	-0,2
	$r/h = 0,10$	-0,7	-1,2	-0,8	-1,4	-0,3	-0,3	+0,2	-0,2
	$r/h = 0,20$	-0,5	-0,8	-0,5	-0,8	-0,3	-0,3	+0,2	-0,2
	$r/h = 0,20$	-0,5	-0,8	-0,5	-0,8	-0,3	-0,3	+0,2	-0,2
	$r/h = 0,20$	-0,5	-0,8	-0,5	-0,8	-0,3	-0,3	+0,2	-0,2
	$r/h = 0,20$	-0,5	-0,8	-0,5	-0,8	-0,3	-0,3	+0,2	-0,2
Bordos amansardados	$\alpha = 30^\circ$	-1,0	-1,5	-1,0	-1,5	-0,3	-0,3	+0,2	-0,2
	$\alpha = 45^\circ$	-1,2	-1,8	-1,3	-1,9	-0,4	-0,4	+0,2	-0,2
	$\alpha = 60^\circ$	-1,3	-1,9	-1,3	-1,9	-0,5	-0,5	+0,2	-0,2
	$\alpha = 60^\circ$	-1,3	-1,9	-1,3	-1,9	-0,5	-0,5	+0,2	-0,2
	$\alpha = 60^\circ$	-1,3	-1,9	-1,3	-1,9	-0,5	-0,5	+0,2	-0,2
	$\alpha = 60^\circ$	-1,3	-1,9	-1,3	-1,9	-0,5	-0,5	+0,2	-0,2

NOTA 1: Para coberturas com platibandas ou com bordos arredondados, poderá ser efectuada uma interpolação linear para valores intermédios de  $h_p/h$  e de  $r/h$ .

NOTA 2: Para coberturas com bordos amansardados, poderá ser efectuada uma interpolação linear entre  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\alpha = 45^\circ$  e  $\alpha = 60^\circ$ . Para  $\alpha > 60^\circ$ , poderá ser efectuada uma interpolação linear entre os valores para  $\alpha = 60^\circ$  e os valores para coberturas em terraço com bordos em aresta viva.

NOTA 3: Na Zona I, para a qual são fornecidos valores positivos e negativos, devem ser considerados ambos os valores.

NOTA 4: Para o bordo amansardado propriamente dito, os coeficientes de pressão exterior são fornecidos no Quadro 7.4a "Coeficientes de pressão exterior para coberturas de duas vertentes: direcção do vento 0", Zonas F e G, em função da inclinação do bordo.

NOTA 5: Para o bordo arredondado propriamente dito, os coeficientes de pressão exterior são calculados, ao longo do bordo, por interpolação linear entre os valores relativos à parede e à cobertura.

Figura D.2 - Coeficientes de pressão por zona EC1[15]

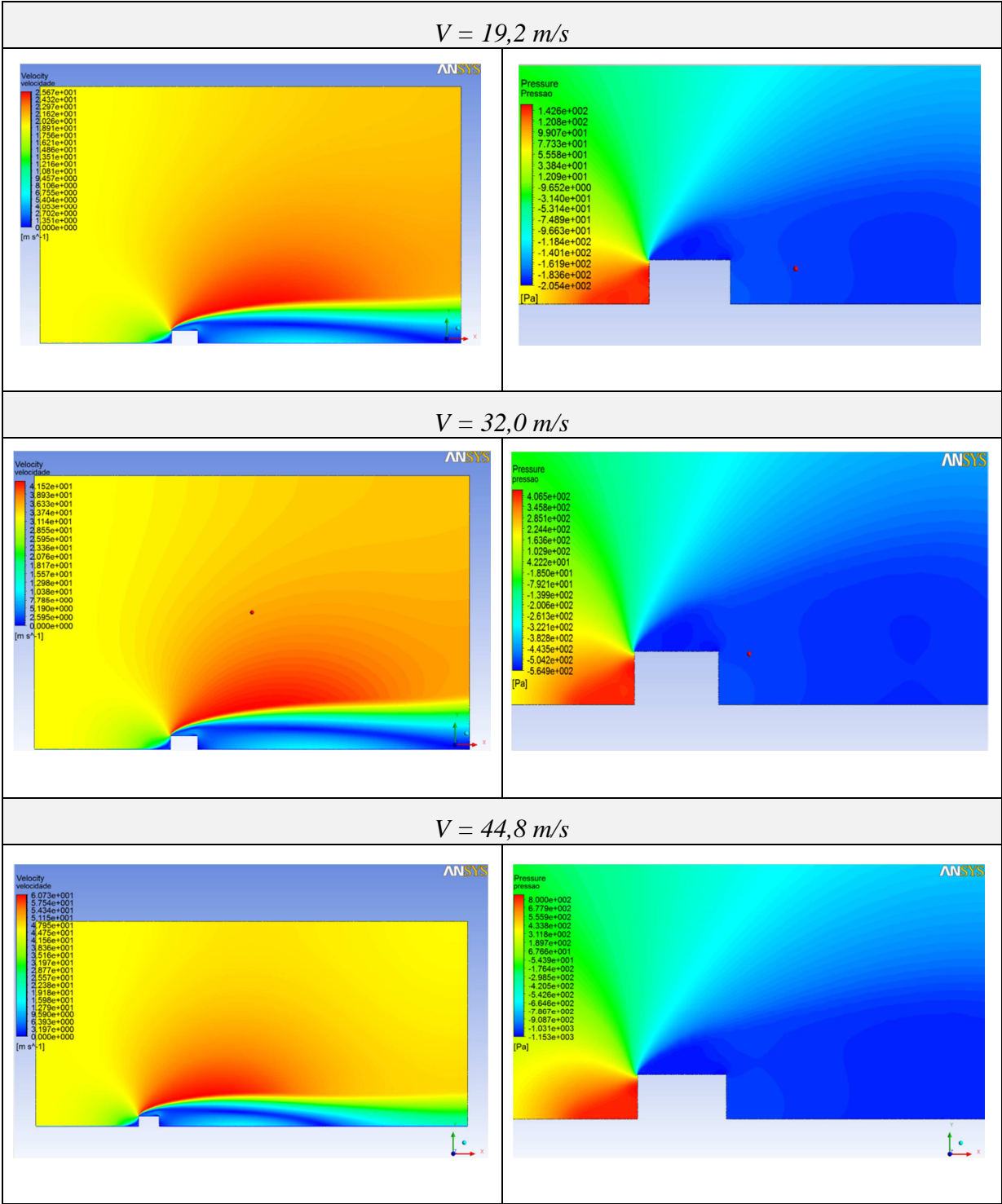
Categoria de terreno		$z_0$ [m]	$z_{min}$ [m]
0	Mar ou zona costeira exposta aos ventos de mar	0,003	1
I	Lagos ou zona plana e horizontal com vegetação negligenciável e livre de obstáculos	0,01	1
II	Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura	0,05	2
III	Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo: aldeias, zonas suburbanas, florestas permanentes)	0,3	5
IV	Zona na qual pelo menos 15 % da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15 m	1,0	10

Figura D.3 - Tipo de terreno EC1[15]

## **ANEXO E: Campos de velocidade e pressão**

### **Contorno de Velocidade e Pressão na Cobertura Plana**

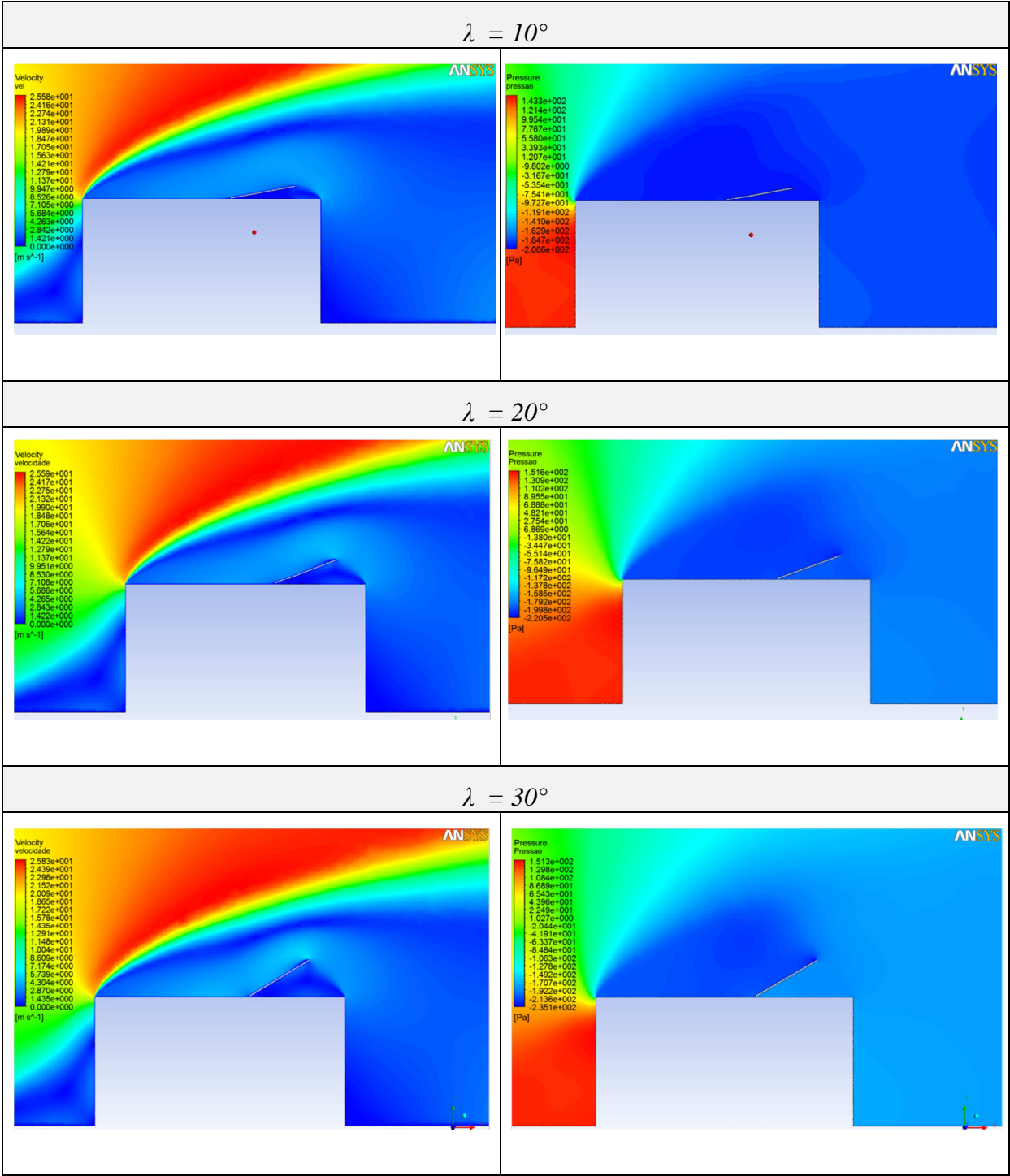
$$\psi = 0^\circ \text{ e } \psi = 180^\circ$$



**Contorno de Velocidade e Pressão na Cobertura e Pannel FV**

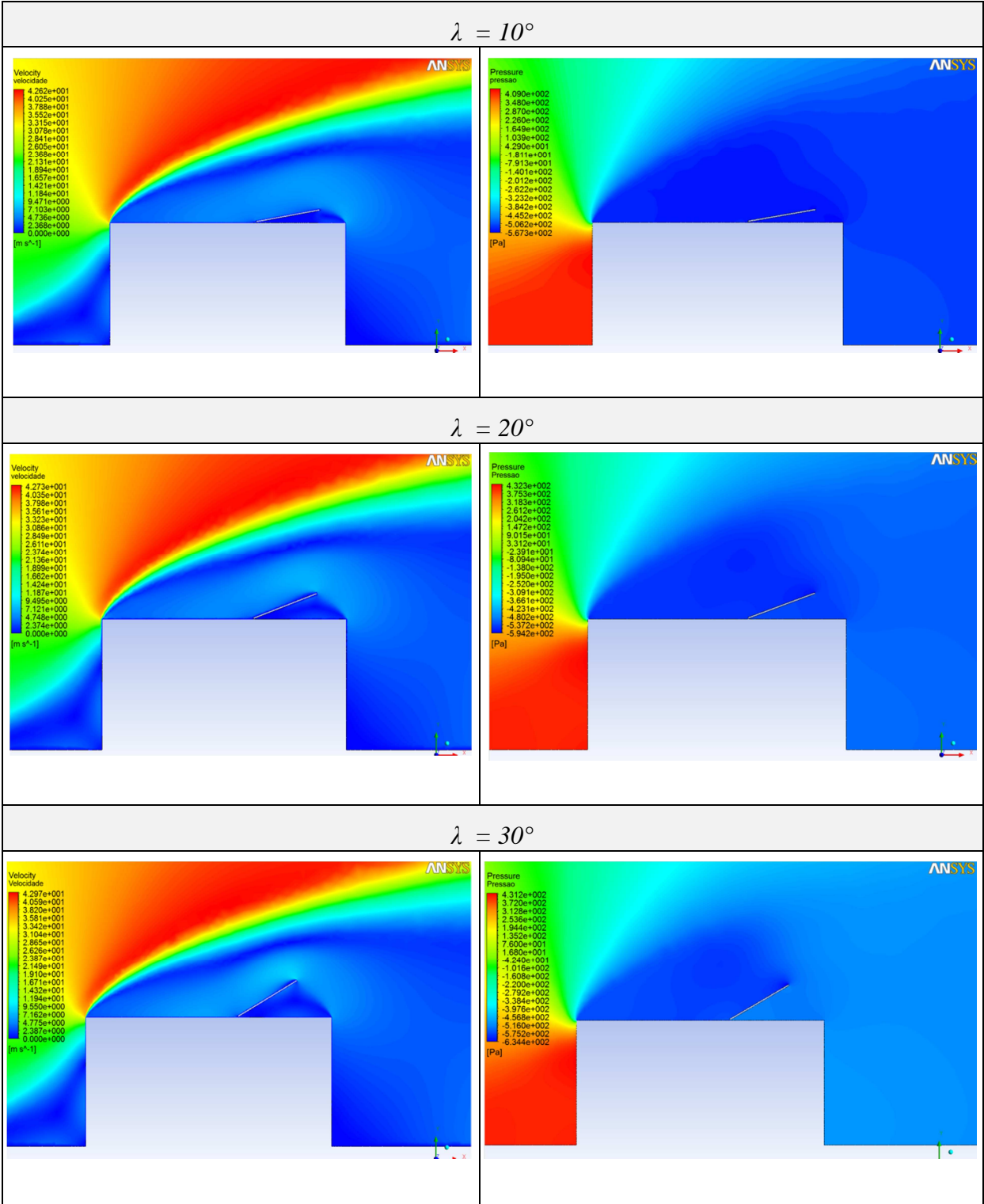
$$\psi = 0^\circ \text{ e } V = 19,2 \text{ m/s}$$





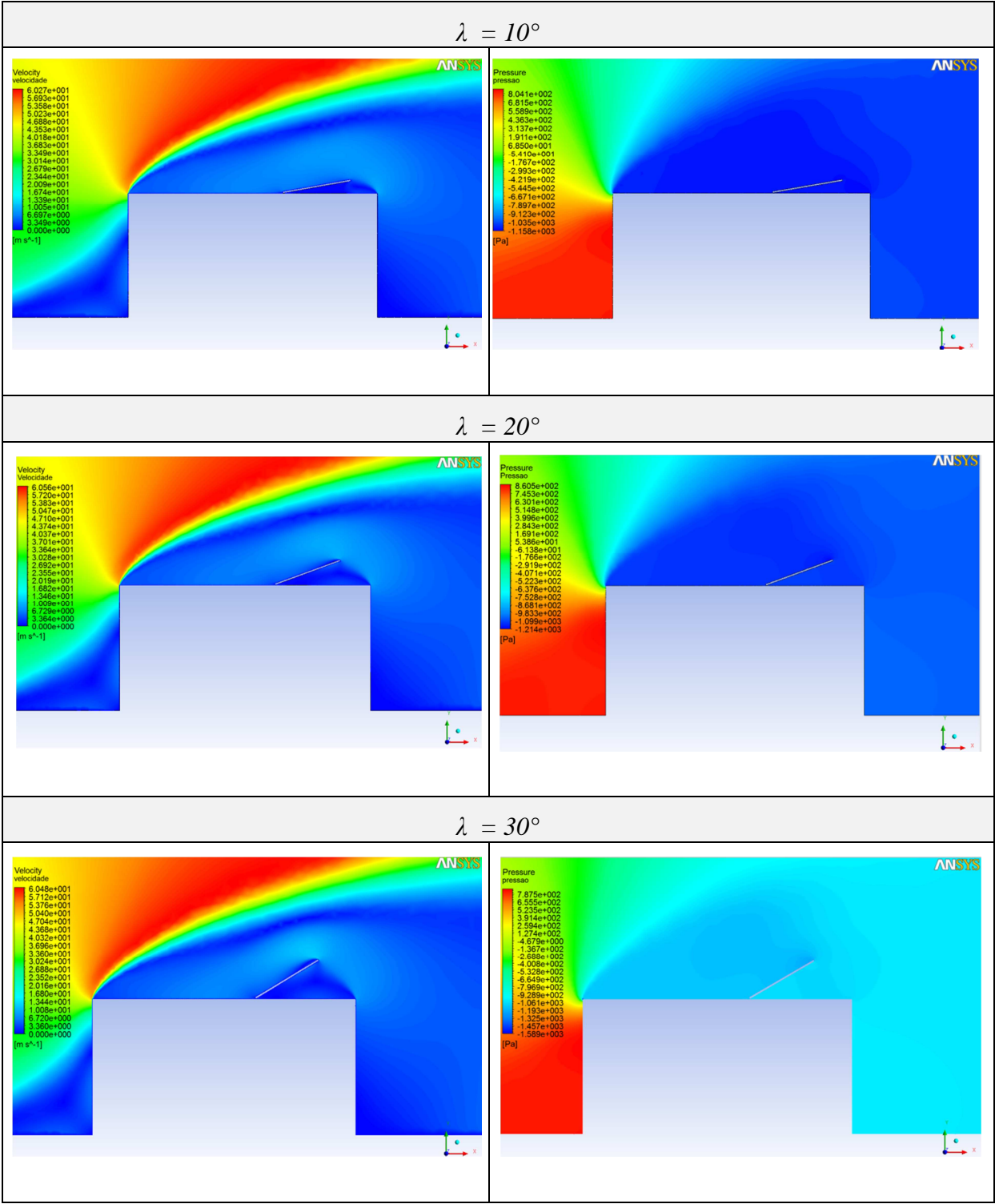
**Contorno de Velocidade e Pressão na Cobertura e Pannel FV**

$$\psi = 0^\circ \text{ e } V = 32,0 \text{ m/s}$$



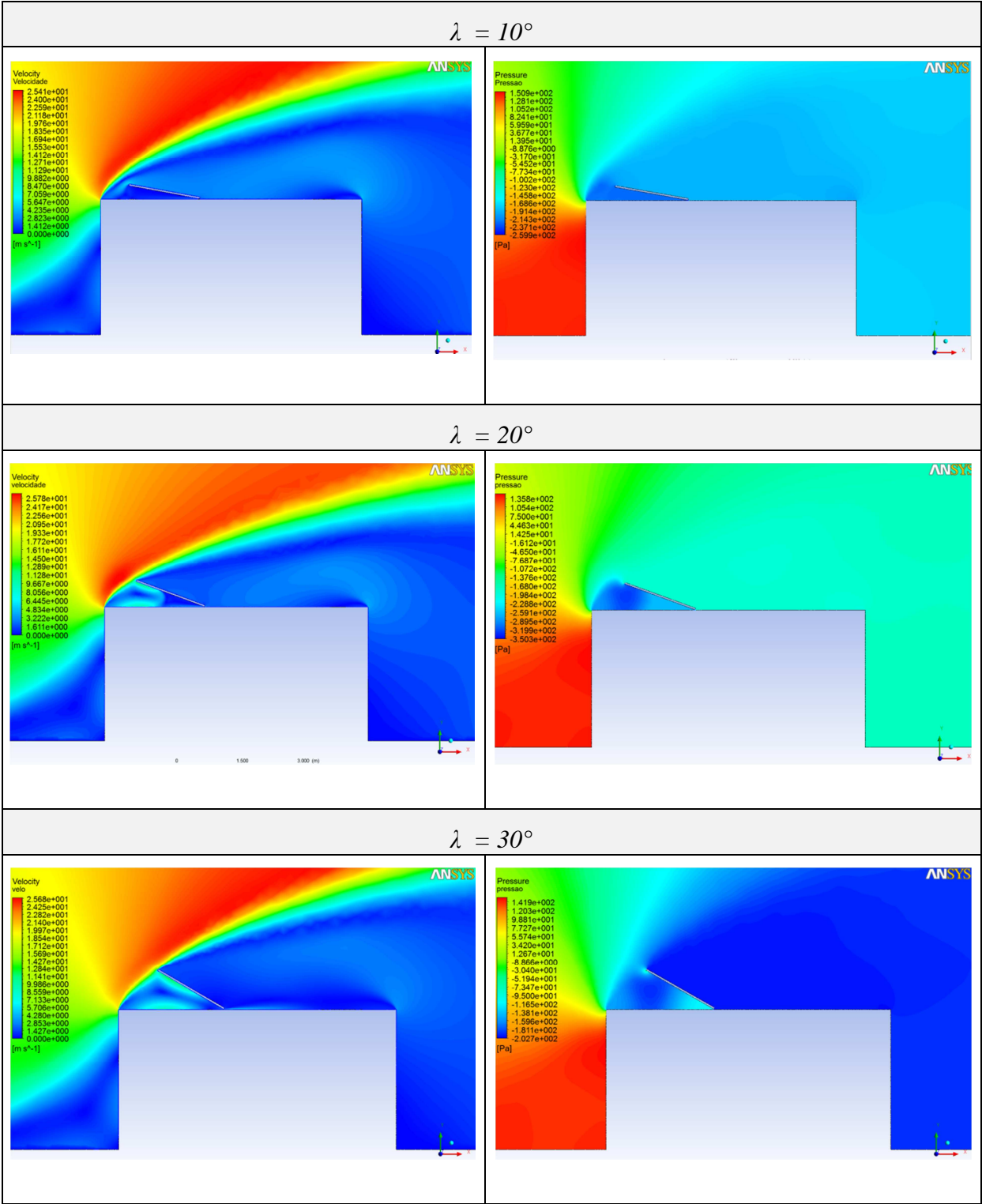
**Contorno de Velocidade e Pressão na Cobertura e Pannel FV**

$$\psi = 0^\circ \text{ e } V = 44,8 \text{ m/s}$$



**Contorno de Velocidade e Pressão na Cobertura e Pannel FV**

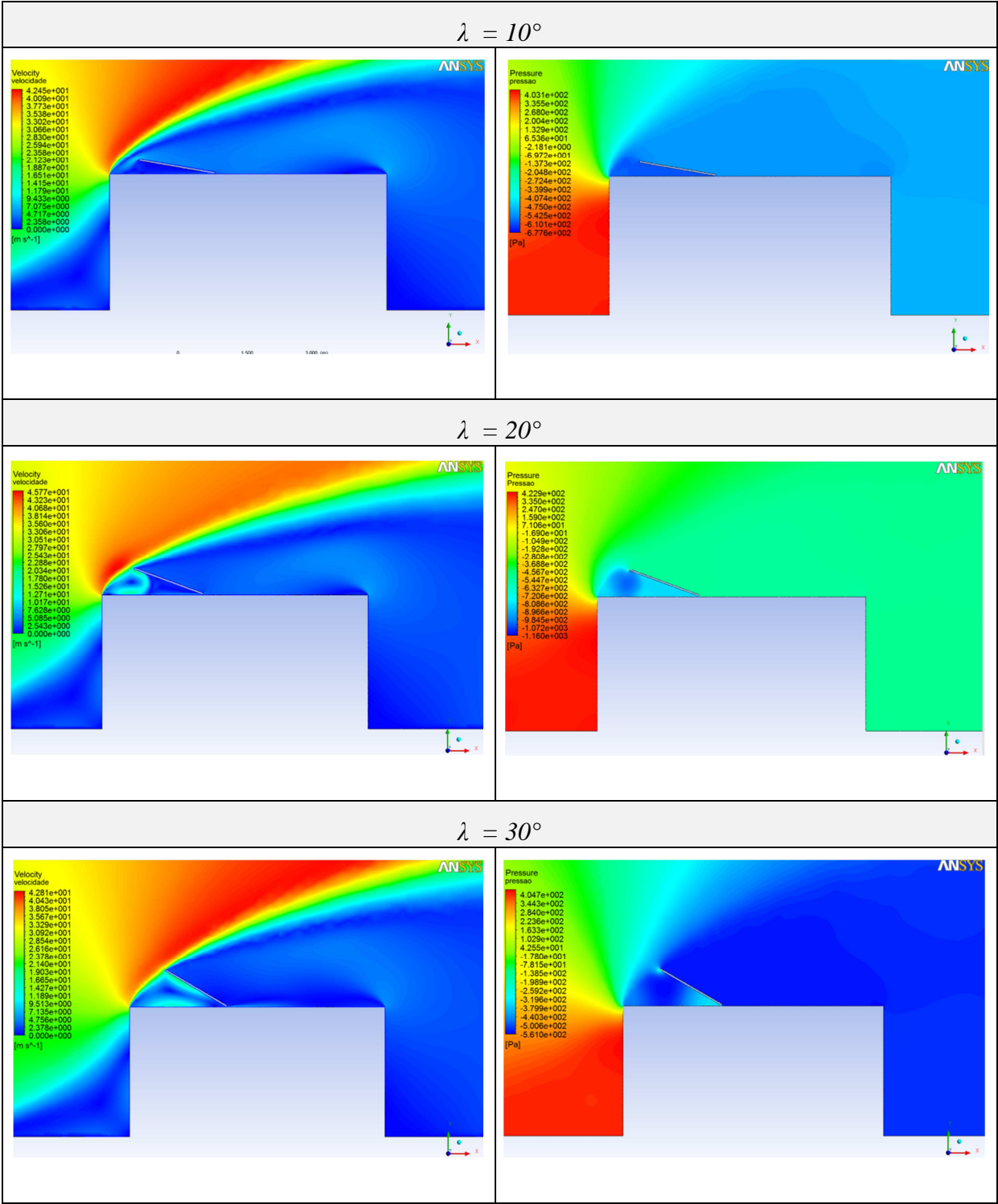
$$\psi = 180^\circ \text{ e } V = 19,2 \text{ m/s}$$



**Contorno de Velocidade e Pressão na Cobertura e Pannel FV**

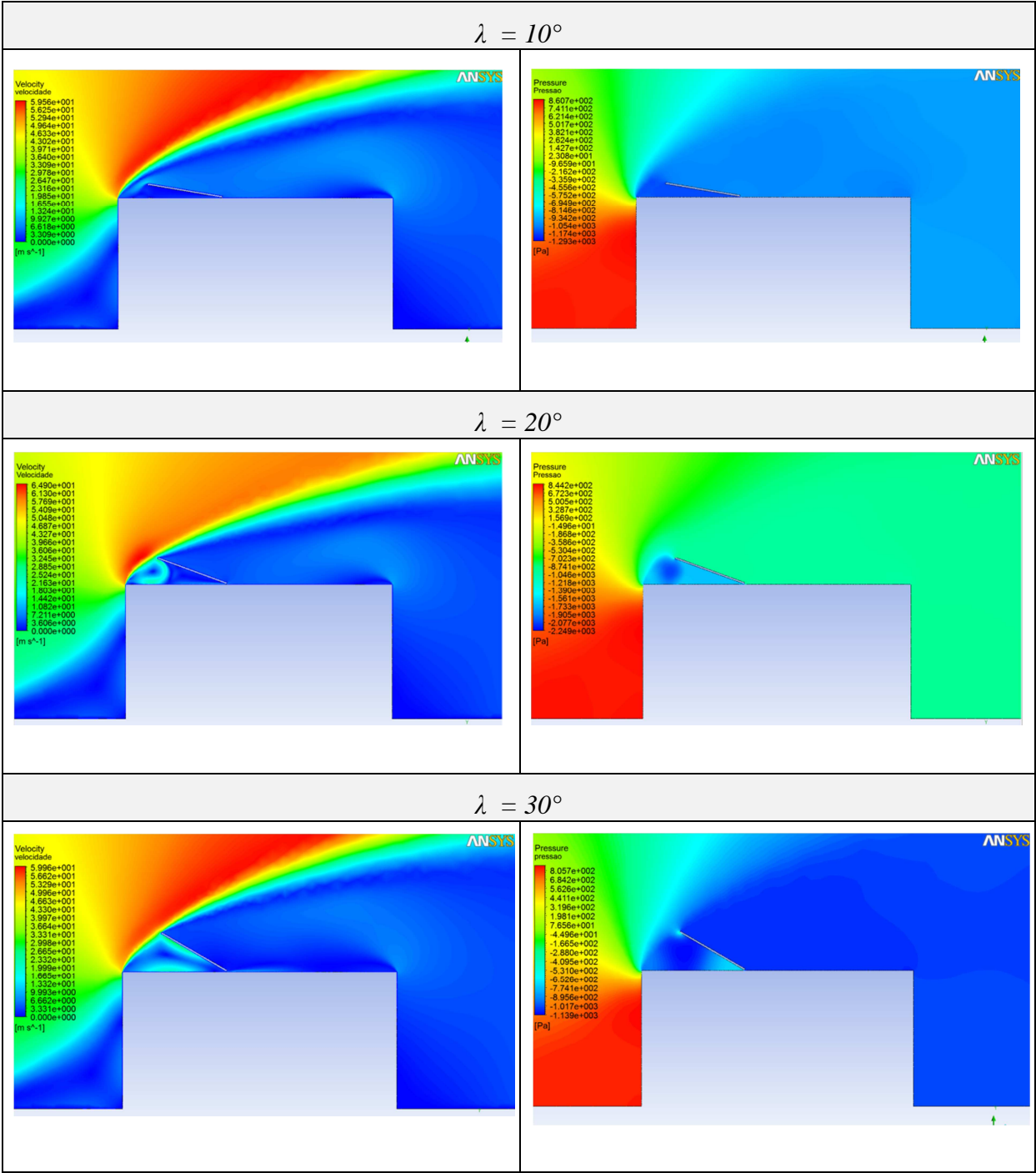
$$\psi = 180^\circ \text{ e } V = 32,0 \text{ m/s}$$





**Contorno de Velocidade e Pressão na Cobertura e Pannel FV**

$$\psi = 180^\circ \text{ e } V = 44,8 \text{ m/s}$$



**Contorno de Velocidade e Pressão na Cobertura e Pannel FV**

*Uso de Platibanda –  $V = 32,0 \text{ m/s}$*

